

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUIS FRANCISCO DA SILVA MORALES

**UTILIZAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO QUIMICAMENTE MODIFICADO
COMO SUPERPLASTIFICANTE NO CONCRETO**

**Alegrete
2015**

LUIS FRANCISCO DA SILVA MORALES

**UTILIZAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO QUIMICAMENTE MODIFICADO
COMO SUPERPLASTIFICANTE NO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Luis Ernesto Roca Bruno

**Alegrete
2015**

LUIS FRANCISCO DA SILVA MORALES

**UTILIZAÇÃO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO QUIMICAMENTE MODIFICADO
COMO SUPERPLASTIFICANTE NO CONCRETO**

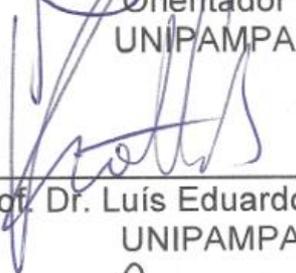
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 4, dezembro de 2015.

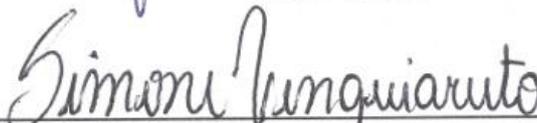
Banca examinadora:



Prof. Dr. Luis Ernesto Roca Bruno
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Luis Eduardo Kostaschi
UNIPAMPA



Prof. Me. Simone Doñelles Venquiaruto
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais por mostrarem-me que somente com perseverança os objetivos são alcançados, à minha avó por acreditar na conquista de meu sonho e aos meus irmãos pelo incentivo nas piores horas.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Dr. Luis Ernesto Roca Bruno pelo incentivo e por ajudar-me a superar as adversidades encontradas durante esta caminhada.

As colegas Liliane, Rosiéli e Lisiani pela grande ajuda no laboratório e pela paciência.

Ao Prof. Dr Fladimir Fernandes pelas sugestões que tornaram a escrita desse trabalho mais fluída.

Aos meus pais, irmãos, avó e tias pela ajuda em todos os momentos.

“Uma pessoa inteligente resolve um problema, um sábio previne-o”.

Albert Einstein

RESUMO

Muitas propriedades do concreto são resultantes da quantidade de água utilizada na mistura de seus componentes, os superplastificantes tem a capacidade de dispersar as partículas de cimento e liberar a água presa entre as mesmas fazendo com que uma menor quantidade de água seja necessária para atingir determinada consistência. O poliestireno sulfonado tem grande potencial para ser utilizado como superplastificante devido a capacidade de ser adsorvido pelas partículas de cimento e induzir forças repulsivas. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas do concreto utilizando o poliestireno sulfonado como superplastificante. A avaliação da influência do poliestireno sulfonado no concreto partiu de um concreto de referência, do qual, foi adicionado diferentes porcentagens de aditivo para alcançar a consistência padrão. As porcentagens avaliadas foram 0,5; 1,0 e 1,5% de aditivo em relação a massa de cimento. O poliestireno sulfonado atuou como dispersante de partículas reduzindo 1,71% e 8,67% da quantidade de água para as porcentagens 0,5% e 1,0% respectivamente. Contudo, a resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral dos concretos curados aos 28 dias foi reduzida à medida que a porcentagem de poliestireno era aumentada. A perda de resistência foi ocasionada devido a redução da massa específica do concreto. O fator determinante para a perda de massa específica e perda da capacidade de dispersão da partícula foi o pH ácido do aditivo resultante após as reações químicas. Não foi observado alterações na absorção de água e índice de vazios para as porcentagens de 0,5% e 1,0% de aditivo, somente a maior porcentagem em relação a massa do cimento obteve uma redução nesses parâmetros.

Palavras-Chave: poliestireno, aditivo, concreto, resistência.

ABSTRACT

Many concrete properties are the result of the amount of water used in the mixture of its components, the superplasticizers have the ability to disperse cement particles and release water trapped between them causing a smaller amount of water is necessary to meet certain consistency. The sulfonated polystyrene has great potential to be used as the superplasticizer due to the ability to be adsorbed onto the cement particles and inducing repulsive forces. This study aimed to evaluate the physical properties of concrete using sulfonated polystyrene as superplasticizer. The influence of sulfonated polystyrene left in the concrete of a reference concrete, which was added different percentages of additive to achieve the standard consistency. Evaluated the percentages were 0.5; 1.0 to 1.5% admixture relative to the cement mass. The sulfonated polystyrene acted as a reducing particle dispersant 1.71% and 8.67% of the amount of water percentage to 0.5% and 1.0% respectively. However, the compressive strength and diametral tensile compression of the cured concrete after 28 days it was reduced as the percentage of polystyrene was increased. The strength loss is caused due to reduction of the specific weight of the concrete. The determining factor for the loss of density and loss of particle dispersibility was pH admixture resulting acid after the chemical reactions. There was no change in water absorption and void index for the percentages of 0.5% and 1.0% additive, only the highest percentage relative to the cement mass obtained a reduction in these parameters.

Keywords: polystyrene, admixture, concrete, strenght

LISTA DE ESQUEMAS

Esquema 1- Diagrama das etapas realizadas.....	35
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas dos fluídos independentes do tempo	18
Figura 2 - Micrografia ótica do clínquer do cimento Portland (não hidratado)	22
Figura 3 - Partículas de pasta de cimento em uma estrutura flokulada.....	24
Figura 4 - Comportamento das partículas de cimento na presença do dispersante..	27
Figura 5 - Dimensão dos poros no cimento.....	34
Figura 6 - Conjunto de peneiras para agregado miúdo	37
Figura 7- Poliestireno expandido coletado	40
Figura 8- Solução de sulfato de acetil resfriada	41
Figura 9- Adição de ácido sulfúrico	42
Figura 10- Reator, condensador e aquecedor vibratório	43
Figura 11- Dissolução do EPS no aparato completo para a reação.....	44
Figura 12- Calibração da temperatura.....	45
Figura 13- Nitrogênio sendo purgado na solução.....	45
Figura 14- Adição do Sulfato de Acetil	46
Figura 15 -Caracterização do pH da solução	47
Figura 16- Medição da consistência.....	51
Figura 17- Corpos-de-prova desmoldados e identificados	51
Figura 18- Máquina Universal para ensaio de compressão	53
Figura 19- Máquina para ensaio em compressão diametral.....	54
Figura 20- Corpos-de-prova imersos em água à 23°C.....	55
Figura 21- Corpos-de-prova imersos em fervura.....	55
Figura 22- Determinação da massa dos CPs na balança hidrostática	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Curva granulométrica agregado miúdo.....	38
Gráfico 2 - Curva granulométrica agregado graúdo.....	39
Gráfico 3- Diagrama de Dosagem.....	48
Gráfico 4- Medida de consistência do concreto fresco através do abatimento.....	57
Gráfico 5- Relação água/cimento dos Corpos-de-prova.....	58
Gráfico 6 – Resistência à compressão axial média e aos 28 dias e relação água/cimento.....	59
Gráfico 7- Média das resistências à compressão diametral aos 28 dias para os concretos.....	62
Gráfico 8- Massa específica da amostra seca média.....	65
Gráfico 9- Massa específica da amostra saturada após fervura média.....	66
Gráfico 10- Massa específica real média.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Especificações técnicas do CP II Z-32	36
Tabela 2- Distribuição granulométrica do agregado miúdo	38
Tabela 3 - Distribuição granulométrica agregado graúdo.....	39
Tabela 4 - Requisitos para concreto de referência.....	48
Tabela 5- Quantitativo dos materiais	50
Tabela 6- Quantidade de corpos-de-prova.....	52
Tabela 7- Requisitos para superplastificante tipo I - Ensaio mantendo a consistência do concreto.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a – relação agregado miúdo seco/cimento em massa
- A – absorção de água
- a/c – Relação água/cimento
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- C_2AH_8 e C_4AH_{19} – Aluminatos de cálcio hidratado
- C_2S – $(2.CaO).(SiO_2)$ – Silicato dicálcico
- C_3A – $(3CaO).(Al_2O_3)$ – Aluminato tricálcico
- C_3S – $(3.CaO).(SiO_2)$ – Silicato tricálcico
- C_4AF – $(4.CaO).(Al_2O_3).(Fe_2O_3)$ – Ferroaluminato tetracálcico
- CR – Concreto de referência
- CV – Concreto com 0,5% de poliestireno sulfonado
- CX – Concreto com 1% de poliestireno sulfonado
- CXV – Concreto com 1,5% de poliestireno sulfonado
- CP – Corpo-de-prova
- C-S-H – Silicatos de cálcio hidratados
- EPS – Poliestireno expandido
- GS – Grau de sulfonação
- H – relação água/materiais secos
- lv – índice de vazios
- m – Relação agregado seco/ cimento
- m_1 – Amostra 1
- m_2 – Amostra 2
- m_i – massa da amostra saturada imersa em água após fervura
- m_s – massa da amostra seca em estufa
- m_{sat} – massa da amostra saturada em água após imersão e fervura
- pH – Potencial de hidrogênio
- PSSNa – Poliestireno sulfonado de sódio
- PS – Poliestireno sulfonado
- SP – Superplastificante
- α – teor seco ideal

SUMÁRIO

1.1	Contextualização do tema de pesquisa.....	16
1.2	Definição do problema e da questão da pesquisa	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo geral	18
1.3.2	Objetivos específicos.....	18
1.4	Justificativa.....	19
1.5	Estrutura do trabalho	19
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	Cimento Portland e Concreto.....	21
2.1.1	Comportamento das partículas do cimento em suspensão.....	23
2.2	Aditivos Químicos	25
2.2.1	Influência do superplastificante na microestrutura do concreto	26
2.3.1	Poliestireno Expandido.....	30
2.3.2	Pesquisas que utilizaram o poliestireno sulfonado como aditivo dispersante em sistemas cimentícios	30
2.4	Durabilidade do concreto	32
2.4.1	Porosidade.....	33
3	METODOLOGIA	35
3.1	Materiais.....	35
3.1.1	Cimento	35
3.1.2	Agregados.....	36
3.1.3	Poliestireno.....	40
3.1.4	Agentes e Reagentes	40
3.2	Métodos.....	41
3.2.1	Modificação química do poliestireno expandido em sulfonado	41
3.2.1.2	Reação de sulfonação.....	42
3.2.2	Caracterização do aditivo	46
3.2.3	Determinação do concreto de referência	47
3.2.3.1	Determinação do traço de referência	48
3.2.4	Preparação do concreto	49
3.2.5	Avaliação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	50
3.2.6	Moldagem e desmoldagem dos corpos-de-prova	51

3.2.7 Determinação da resistência à compressão axial.....	52
3.2.8 Determinação da resistência à tração por compressão diametral	53
3.2.9 Determinação da absorção de água, através de imersão, do índice de vazios e massa específica.....	54
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1 Consistência	57
4.2 Relação a/c.....	57
4.3 Ensaio de compressão axial	58
4.4 Resistência à tração por compressão diametral	62
4.5 Absorção de água por imersão e índice de vazios	63
4.6 Massa específica	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTUROS.....	70

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema de pesquisa

A resistência do concreto é a propriedade mais valorizada pelos projetistas e controle de qualidade dos engenheiros. Em materiais sólidos, existe uma relação inversa entre porosidade (fração de volume de vazios) e força resistente, por conseguinte, em materiais compósitos tais como o concreto, a porosidade de cada componente da microestrutura pode tornar-se um limitante da resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A relação água/cimento influencia diretamente no índice de vazios do concreto endurecido, quanto menor a relação água/cimento menores serão os poros neste tipo de material (OKPALA, 1989; AİTCIN, 1998; PEREIRA, 2011). No entanto, a resistência não é a única propriedade afetada pela relação água/cimento, pois, conforme Vilasboas (2004), a potencial qualidade do concreto depende preponderantemente da relação água/cimento e do grau de hidratação. Estes dois principais parâmetros regem as propriedades de absorção capilar de água, de permeabilidade, de migração de íons, assim como todas as demais propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade, resistência à tração, fluência, relaxação, abrasão, dentre outras.

A produção do concreto exige muito mais água do que o cimento necessita para a sua hidratação. Por adição de pequenas quantidades de misturas poliméricas, chamados superplastificantes, pode-se diminuir consideravelmente a quantidade de água necessária para obter a trabalhabilidade pretendida e, conseqüentemente, reduzir a porosidade, melhorando assim a durabilidade da estrutura (FLATT; BOWEN, 2003).

Os superplastificantes podem ser utilizados na mistura do concreto em dosagens consideravelmente mais elevadas do que as misturas com redutores de água comuns sem efeitos secundários adversos, tais como retardamento da cura. Todos os superplastificantes são compostos de alto peso molecular e polímeros solúveis em água. O efeito dos superplastificantes sobre hidratação do cimento é principalmente devido a fatores físicos, em vez de interação química. O aditivo melhora a dispersão de grãos dos cimentos individuais levando a hidratação mais eficiente e maior resistência inicial. Ao aumentar a trabalhabilidade obtida a partir de

um teor de água fixo, torna-se mais fácil o lançamento e compactação da mistura (EDMEADES; HEWLETT, 1998).

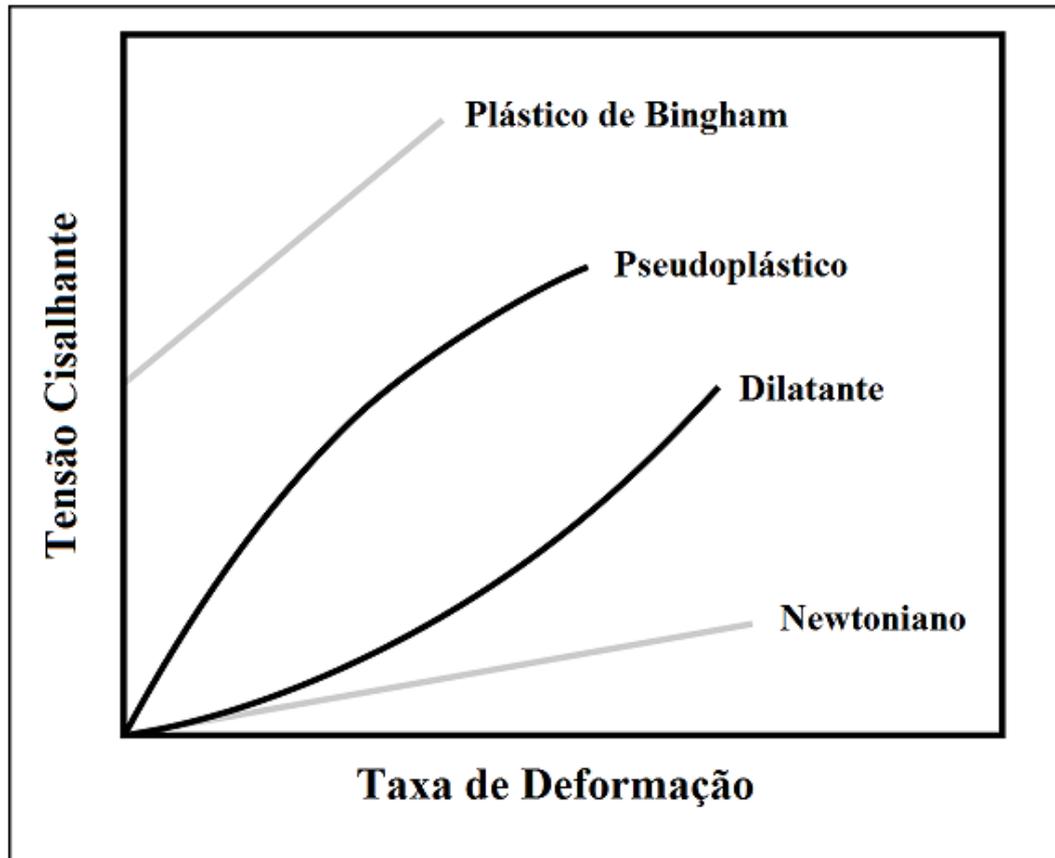
1.2 Definição do problema e da questão da pesquisa

A maioria dos aditivos de redução de água de alta capacidade, é feita a partir de sulfonados orgânicos e, é denominada superplastificante em vista a sua considerável capacidade para facilitar a redução de água numa mistura de concreto, aumentando simultaneamente sua consistência (NAWY, 2001). Autores como Assunção et al. (2005), Omena (2012), Souza (2012) e Araújo, Freire e Tello (2013) estudaram os efeitos da aplicação do poliestireno sulfonado como aditivo em misturas de argamassa e concreto.

O poliestireno sulfonado obtido a partir do poliestireno expandido tem alta capacidade de aumentar o grau de dispersão das partículas de cimento, e esta capacidade está relacionada com o grau de adsorção do polímero sobre as partículas de cimento. A presença do polímero afeta fortemente o comportamento fluído das suspensões do cimento, que pode ser do tipo dilatante ou pseudoplástico dependendo da concentração do polímero, ambos são comportamentos independentes do tempo. Esses fluídos apresentam taxas de deformação dependentes exclusivamente da tensão de cisalhamento aplicada (KOŁTUŃCZYK; NOWICKA, 2007).

As curvas que exemplificam essa relação entre tensão e deformação são observadas na Figura 1.

Figura 1 - Curvas dos fluídos independentes do tempo



Fonte: adaptado de Steffe (1996)

Diante o exposto, apresenta-se a seguinte questão de pesquisa: quais seriam as melhorias físicas na produção de um concreto utilizando poliestireno expandido quimicamente modificado como aditivo superplastificante?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades físicas de um concreto utilizando poliestireno expandido quimicamente modificado como aditivo superplastificante.

1.3.2 Objetivos específicos

- Modificar o poliestireno expandido a partir de reações de sulfonação.
- Comparar resultados de ensaios de resistência à compressão axial com adição de diferentes teores do aditivo e relação a/c.

- c) Comparar resultados de ensaio de absorção de água, através de imersão, do índice de vazios e massa específica do concreto com adição de diferentes teores do aditivo e relação a/c.
- d) Comparar resultados de ensaios de resistência à tração por compressão diametral com adição de diferentes teores do aditivo e relação a/c.
- e) Confirmar o aditivo criado a partir da sulfonação do poliestireno expandido como um superplastificante.

1.4 Justificativa

Conforme Aïtcin (2000), o concreto do amanhã será sustentável. Terá uma baixa relação água/ligante, será mais durável e terá várias características que serão bastante diferentes umas das outras para utilização em diferentes aplicações na engenharia.

Dessa forma, torna-se imprescindível pesquisas que visam diminuir a quantidade de água utilizada no concreto e, conseqüentemente, reduzir sua porosidade e aumentar a trabalhabilidade, durabilidade e resistência.

De acordo com Tessari (2006), em todo o mundo a disposição final de resíduos de poliestireno expandido representa um problema de difícil solução. Este material apresenta pouco ou nenhum valor comercial, desta forma não se torna uma preferência nas coletas sendo disposto em locais como terrenos abandonados ou aterros sanitários. A indústria da construção civil tem o potencial de absorver os resíduos de EPS gerados anualmente, tanto para utilização de concretos leves quanto para seu uso como aditivo.

Como o emprego do poliestireno expandido quimicamente modificado vem se mostrando promissor em misturas de concreto como aditivo, um estudo para confirmar seus potenciais efeitos de reduzir a quantidade de água é necessário para a ampla utilização desse aditivo.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho foi dividido em seis capítulos dos quais o primeiro encontra-se a introdução, os objetivos gerais e específicos, definição do problema de pesquisa e a justificativa da pesquisa.

No segundo consta a fundamentação teórica, sendo abordados tópicos com relação a microestrutura do concreto e cimento portland, comportamento das

partículas de cimento, aditivos químicos, o poliestireno sulfonado como aditivo, durabilidade do concreto, porosidade e também foram apresentados alguns resultados encontrados em outros trabalhos que abordam o poliestireno sulfonado como aditivo no concreto.

No terceiro, é apresentado os procedimentos metodológicos que foram utilizados para realização da pesquisa científica. Nele consta os passos para produção do aditivo e concreto assim como os ensaios dos corpos-de-prova.

O quarto capítulo mostra os resultados da pesquisa e discussão sobre a influência do aditivo na mistura de concreto.

O quinto expõe as referências bibliográficas utilizadas em todos os capítulos do trabalho.

O sexto capítulo aborda sugestão de trabalhos futuros relacionados ao tema de pesquisa.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cimento Portland e Concreto

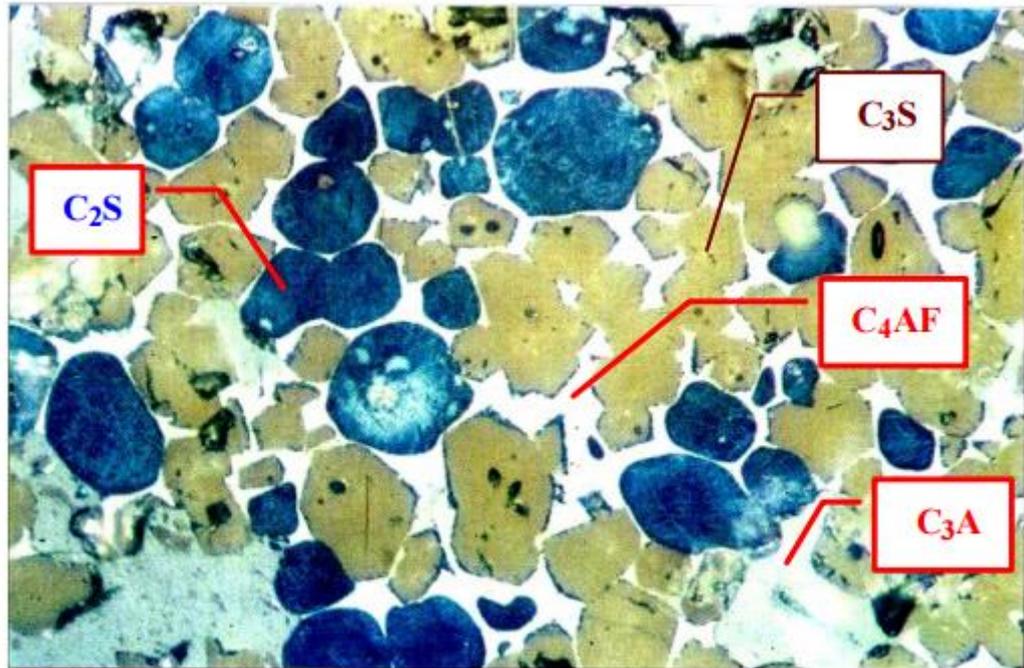
O concreto é o material de construção mais utilizado do mundo, a Associação de Cimento Portland estima uma produção anual de mais de 4 bilhões de metros cúbicos. O concreto possui muitas características que o tornam um material de construção tão amplamente usado. Entre elas estão a disponibilidade de matéria-prima, a capacidade de o concreto tomar a forma do molde onde é colocado e a facilidade com que suas propriedades podem ser modificadas (MAROTTA, 2005).

Tal material é constituído por agregados miúdos e graúdos envolvidos por uma pasta de cimento Portland e espaços cheios de ar (SOBRAL, 2000). O principal constituinte do concreto é o cimento Portland, conforme Jackson (1998) o cimento é um ligante hidráulico, ou seja, um material inorgânico finamente triturado que, quando misturado com água, forma uma pasta que fixa e endurece por meio de reações de hidratação e processos que, após o endurecimento, mantem sua resistência e estabilidade mesmo sob a água.

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal, sílica, alumina e óxido de ferro, estes constituem, geralmente, 95 a 96% do total na análise de óxidos. A mistura de matérias-primas, finalmente pulverizada e homogeneizada, é submetida à ação do calor no forno até a temperatura de fusão incipiente resultando o clínquer. Nesse processo ocorrem combinações químicas que conduzem à formação de compostos como o silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) (OLIVEIRA, 2000a).

Conforme a Figura 2 podemos ver a distribuição dos compostos e comparar suas dimensões.

Figura 2 - Micrografia ótica do clínquer do cimento Portland (não hidratado)



Fonte: adaptado de Poole, St John e Sims (1998)

Em termos estritamente químicos, hidratação é a reação de um composto anidro com água obtendo-se um novo composto, o hidrato. A hidratação química do cimento entende-se como uma reação de um cimento não hidratado, ou um dos seus constituintes, com a água, associados com alterações químicas e físico-mecânicas do sistema, em particular, com a conformação e endurecimento (ODLER, 1998).

Lawrence (1998) afirma que a ação cimentícia do cimento Portland deriva em grande parte a partir da reação química de componentes silicatos tricálcico e dicálcico com água (hidratação). Os produtos de hidratação oriundos da reação do cimento preenchem gradualmente os espaços entre as partículas do agregado para se obter uma matriz contínua, produzindo um composto relativamente impermeável que é resistente na compressão. A hidratação do silicato de cálcio tem solubilidade limitada em água e isto constitui a base da sua durabilidade.

A reação dos silicatos (C_3S e C_2S) com a água produz silicatos de cálcio hidratados amorfos conhecidos como compostos de C-S-H, este é a principal "cola" que une a areia e partículas de agregado. O C-S-H tem uma relação de cálcio (Ca) para silício (Si) típica de 1.7, isto é consideravelmente menor que a proporção de 3:1 em C_3S , o excesso de Ca é precipitado como cristais de hidróxido de cálcio (CH) (MOIR, 2003).

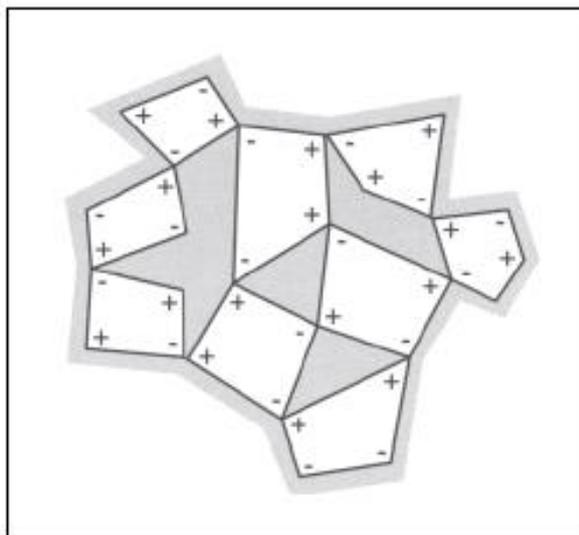
Em relação a hidratação dos aluminatos (C_3A e C_4AF), Moir (2003) explica que na ausência de sulfatos de cálcio solúvel, o C_3A reage rapidamente para formar as fases C_2AH_8 e C_4AH_{19} (aluminatos de cálcio hidratado), que, subsequentemente, convertem-se em C_2AH_6 , esta reação é rápida e altamente exotérmica. Se o gesso finamente moído ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ou hemi-hidrato ($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$) adicionado na fabricação do cimento é combinado com o C_3A na mistura com água, as primeiras reações serão controladas pela formação de uma camada protetora de etringita na superfície dos cristais de C_3A . As etringitas assumem formas de agulhas e começam minutos após o início da hidratação, sendo estas responsáveis pelo fenômeno da pega.

2.1.1 Comportamento das partículas do cimento em suspensão

Do ponto de vista da reologia, ciência voltada para o estudo das deformações e escoamento de um fluido sob a influência de tensões, o concreto em seu estado fresco pode ser entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido (pasta de cimento) (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Segundo Aïtcin (1998) as partículas de cimento, caracterizado por muitas cargas superficiais insaturadas, apresentam uma grande tendência à aglomeração quando entram em contato com um líquido tão polar quanto a água, entre elas podemos citar as forças de atração interpartículas (forças de van der Waals), forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos. Assumir tal estrutura aglomerada implica na retenção de certa quantidade da água de mistura e, com isso, na geração de uma rede aberta de canais entre as partículas como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Partículas de pasta de cimento em uma estrutura floculada



Fonte: Aitcin (1998, p. 121)

A água quimicamente ligada ao gel C-S-H é o componente fundamental após a ocorrência da hidratação, já a água fisicamente adsorvida nas superfícies externas de C-S-H e a restante, denominada água livre, residem nos poros do gel e são identificadas juntas como água evaporável (CALDARONE, 2009).

Essa rede de vazios pode aprisionar parte da água que, por essa razão, fica indisponível para hidratar todas as superfícies das partículas de cimento totalmente e para fluidificar a mistura. A fim de conferir um certo nível de trabalhabilidade no concreto, é necessário usar mais água do que é necessário para hidratar todas as partículas de cimento. Esta água de mistura adicional, da qual não será ligada a qualquer uma das partículas de cimento, gera porosidade dentro da pasta de cimento hidratado, resulta num enfraquecimento das propriedades mecânicas do concreto e uma diminuição na sua durabilidade (AÏTCIN, 1998).

Como é impossível fabricar cimentos Portland que não floculem, a fim de melhorar a hidratação é necessário encontrar aditivos químicos capazes de reduzir esta tendência natural para a floculação, e assim reduzir a quantidade de água necessária para a mistura (AÏTCIN, 1998).

Nos últimos dez a quinze anos vimos o desenvolvimento e uso crescente de vários tipos de concreto de alto desempenho, a maioria destes contêm uma combinação de aditivos e terá, portanto, propriedades reológicas muito diferentes aos de misturas "normais" (DOMONE, 2003).

Damineli (2013) constatou que dispersantes ou misturas mais eficiente podem aumentar a dispersão das partículas, isso possibilita uma diminuição do teor de água

para a mesma reologia sem alterar os outros parâmetros da mistura, diminuindo assim a relação a/c e aumentando a resistência para o mesmo teor de ligantes. Uma das principais causas da baixa eficiência no uso do cimento como ligante é acreditar que ele é responsável por promover reologia no concreto, pois o cimento tem a propriedade de colar o sistema e não para mover os agregados.

2.2 Aditivos Químicos

De acordo com Figueiredo e Rêgo (2007), aditivos químicos para sistemas cimentícios são produtos utilizados para modificar as propriedades do material fresco ou endurecido, aprimorando a trabalhabilidade e incrementando a resistência diante das solicitações físico-químicas desse material. Hoje são largamente utilizados no preparo de concreto, podem até ser considerados o quarto componente neste material, além da água, do cimento e dos agregados. Existe uma tendência crescente da utilização dos aditivos, tendo em vista, principalmente, o aumento da relação custo-benefício da utilização desses materiais.

Uma prática comum ao produzir concretos de alta resistência é usando um redutor de água de alta performance (superplastificante), este aditivo proporciona trabalhabilidade em misturas com baixa relação água/cimento levando à um concreto com maior resistência (CALDARONE, 2009). Esses aditivos que melhoram a fluidez do concreto têm sido fundamentais na produção de concretos com alto desempenho (SCRIVENER; KIRKPATRICK, 2008).

A NBR 11768 (ABNT, 2011) classifica superplastificante como todo produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantendo a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir um concreto com determinada consistência.

O uso de aditivos superplastificantes acarreta numa mudança da reologia da pasta tornando-a mais fluída, isto possibilita a redução do volume de pasta no concreto mantendo o mesmo abatimento. Nos concretos, o volume de pasta é bem superior aos vazios existentes entre as partículas de agregado, a redução deste volume, devida a utilização do aditivo, não implica na falta de pasta para envolver os grãos (HELENE; TRINDADE, 2007).

Uma dose de 1 a 2% em peso de cimento é aconselhável. Doses mais elevadas podem resultar em uma redução na resistência à compressão, a menos que a

quantidade de cimento seja aumentada para compensar este efeito de redução. Deve notar-se que superplastificantes exercem a sua ação através da diminuição da tensão superficial da água e por carregamento equidirecional das partículas de cimento (NAWY, 2001).

2.2.1 Influência do superplastificante na microestrutura do concreto

As propriedades do concreto são governadas pelo seu comportamento fluído, que por sua vez é controlado pela dispersão das partículas de cimento. É amplamente conhecido que uma melhor fluidez é conseguida pela adição de superplastificantes (SPs), o papel dos SPs em concreto, portanto, torna-se cada vez mais importante. Os SPs são adsorvidos sobre as partículas de cimento, que desfloculam e se separam, liberando a água presa nos poros do cimento (CHANDRA; BJORNSTROM, 2002a).

A adição de SP na hidratação do cimento é esperada para influenciar grandemente os aspectos micro estruturais (CSH e fases sólidas). Um dos principais aspectos de um sistema à base de cimento é a sua capacidade para evitar a lixiviação dos materiais perigosos. Lixiviação de qualquer forma de resíduos de dentro da matriz cimentícia aos ambientes circundantes, bem como o processo inverso através destas estruturas porosas e micro porosas (MOLLAHT et al., 1995).

Vários tipos de forças coexistem em uma suspensão de cimento. Em primeiro lugar, há a força browniana que influencia a orientação espacial e arranjo das partículas. Esta força é fortemente dependente das dimensões e tem uma grande influência em partículas com tamanhos menores que 1 μm (NEHDI; MINDESS; AİTCIN, 1998).

Em segundo lugar, há forças de origem coloidal que surgem a partir de interações mútuas entre partículas e são afetadas pela polaridade da água. Quando a atração van der Waals entre os grãos de cimento e a atração eletrostática entre as cargas contrárias na superfície de partículas são dominantes, o resultado líquido é uma atração, e as partículas tendem a flocular. No entanto, na presença de materiais poliméricos na superfície dos grãos de cimento, o resultado é uma repulsão e as partículas permanecem separadas. Assim, na presença de dispersantes, melhores serão as propriedades reológicas do concreto (NEHDI; MINDESS; AİTCIN, 1998).

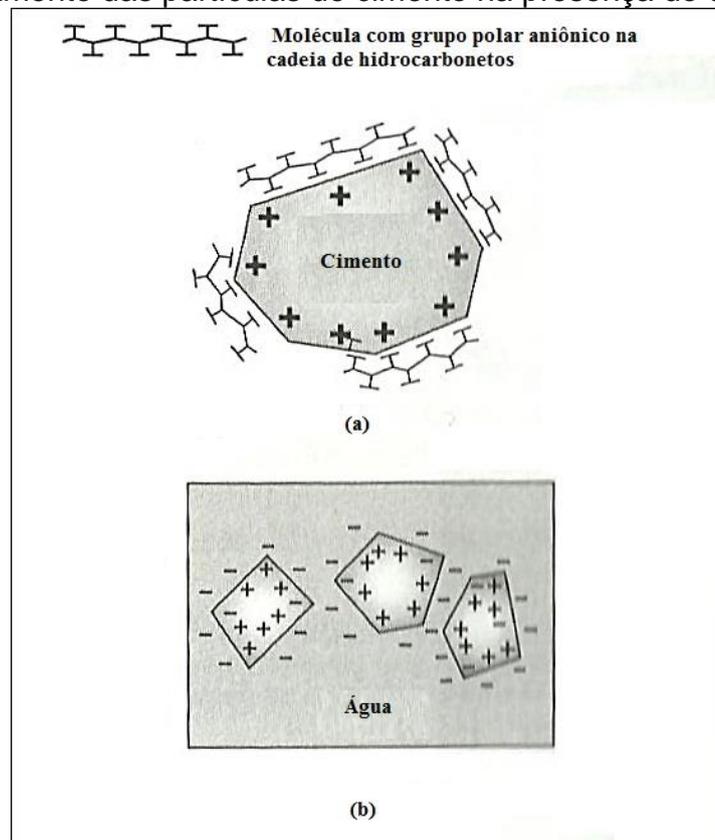
A adsorção de superplastificantes na interface sólido-líquido induz forças interpartícula que são de ambos de origens estérica (relativo ao volume dos átomos)

e eletrostáticas (relativo à eletricidade estática). O alcance e a magnitude de cada contribuição dependem de vários parâmetros, por exemplo, quantidade adsorvida, grau de dissociação do polímero, densidade de carga de superfície líquida e força iônica (CLEVELAND et al., 1993 apud KAUPPI; ANDERSSON; BERGSTRFM, 2005).

Para se obter suspensões dispersas, as forças de repulsão entre as partículas devem superar as forças de atração. Assim, o uso de dispersantes torna-se necessário para evitar a sedimentação de partículas e consequente segregação de fases, possibilitando a preparação de suspensões homogêneas com alta concentração de sólidos. Esses aditivos são eficientes na desaglomeração das estruturas de partículas de cimento e em sua dispersão, evitando uma ligação prematura, minimizando a quantidade de água necessária para a adequada trabalhabilidade da suspensão e resultando em misturas trabalháveis pelo intervalo de tempo necessário à sua aplicação. (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009, p. 19)

Na Figura 4 está representado o comportamento das partículas de cimento na presença do dispersante.

Figura 4 - Comportamento das partículas de cimento na presença do dispersante



Fonte: adaptado de Mehta e Monteiro (2006)

Conforme a Figura 4, pode-se dizer que superplastificantes são constituídos de tensoativos aniônicos de cadeia longa, de alto peso molecular com um grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarboneto que em si é polar ou hidrofílica. Quando um tensoativo com cadeia hidrofílica é adicionado ao sistema de água de cimento, a cadeia polar é adsorvida juntamente com as partículas de cimento. Neste caso, o dispersante direciona uma extremidade polar, em vez de uma extremidade apolar, em direção à água, assim, reduzindo a tensão superficial da água e fazendo com que as partículas de cimento se tornem hidrofílicas (Figura 4a). Como resultado da camada de água (dipolo) em torno da partícula de cimento hidrofílico, sua floculação é impedida e obtém-se um sistema bem disperso (Figura 4b) (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A cadeia polimérica fica aderida às partículas nas regiões de carga oposta, fazendo com que toda superfície externa se apresente apolar. Desse modo, quando duas ou mais partículas estabilizadas tentarem entrar em contato, ocorrerá uma repulsão estérica, impedindo que a força de atração de Van der Waals atue, evitando a formação de aglomerados de partículas de cimento, que imersas na fase líquida, tornam-se bipolares. A quantidade de moléculas adsorvidas na superfície do cimento varia de acordo com a área superficial das partículas e com o grupo funcional das moléculas, e pode ser determinada pelo ensaio de ponto de saturação. Quanto maior for a área superficial das partículas, maior será a quantidade necessária de moléculas para recobri-la (FORMAGINI, 2005, p. 88-89).

O potencial elétrico na superfície das partículas não pode ser aferido precisamente, portanto a forma mais coerente de avaliar a energia de repulsão entre as partículas é a partir de experimentos baseados na mobilidade eletroforética das partículas (velocidade com que as partículas coloidais se movimentam sob a aplicação de um potencial elétrico). Este potencial onde ocorre o cisalhamento quando uma partícula se movimenta no líquido é denominado Potencial Zeta (LYRA, 2010).

O potencial zeta inicial do cimento sem aditivos é elevado e tem valor positivo. Isto é provavelmente decorrente da dissolução dos produtos de cálcio, como o do sulfato de cálcio, e a adsorção do íon Ca^{2+} preferencialmente na superfície das partículas de cimento. Uma diminuição significativa do potencial zeta inicial ocorre nos primeiros minutos após a introdução do aditivo. Comparando com cimento sem aditivo pode-se supor que a adsorção

de moléculas com grupos ionizáveis negativos sobre as partículas do cimento, que se apresentam prioritariamente positivas, reduz a mobilidade eletroforética simultaneamente por dois mecanismos principais: diminuição da carga elétrica de superfície (positiva) por adsorção de macromoléculas (negativas) e aumento do raio hidrodinâmico da partícula. Estes fenômenos proporcionam uma diminuição na distribuição de carga superficial da partícula simultaneamente ao aumento do tamanho e peso da mesma, como resultado, tem-se diminuição do potencial zeta (LYRA, 2010, p. 69).

Para estes componentes minerais do cimento, os superplastificantes não são esperados para adsorver uniformemente. Alguns componentes minerais podem adsorver uma quantidade muito maior do que os outros. Uma maior quantidade do superplastificante é adsorvida em partículas C_3A e C_4AF do que nos C_3S e C_2S . No entanto, há um equilíbrio da concentração do superplastificante na adsorção máxima (YOSHIOKA et al., 2002).

Para que a estabilização seja eficiente, a ligação entre o polímero e a superfície da partícula de cimento deve ser forte a fim de evitar a ocorrência de dessorção (liberação da substância na superfície) durante movimentação da partícula. No caso de partículas com superfícies apolares, o polímero deve recobrir toda a superfície da partícula e a camada adsorvida deve possuir espessura maior do que a distância na qual as forças de Van der Waals ainda são significativas no processo de aglomeração (FORMAGINI, 2005)

De acordo com Chandra e Bjornstrom (2002b), o diâmetro médio das partículas de cimento é tipicamente de 10 μm e o tamanho das moléculas de SP é da ordem de alguns nanômetros. A medida que a reação de hidratação prossegue, a quantidade de água livre diminui, e o mesmo acontece com a distância entre as superfícies de hidratação das partículas de cimento vizinhas (hidrato). Como o volume interpartícula torna-se menor, a concentração de moléculas de SP torna-se mais elevada, esta concentração confinada neste volume pode criar um efeito significativo de pressão osmótica, que tende a expulsar as moléculas de SP do volume interpartícula confinado, ou criar um escoamento de água para diluir as moléculas de polímero naquela região. O primeiro efeito resulta na indução da atração entre as partículas enquanto o segundo induz à repulsão adicional partícula-partícula.

2.3 O Poliestireno Sulfonado como Aditivo

2.3.1 Poliestireno Expandido

Polímeros são materiais compostos de origem natural ou sintética que apresentam massa molar elevada, formados pela repetição de um grande número de unidades estruturais básicas. O poliestireno expandido (EPS), mais conhecido pelo nome comercial isopor, é uma espuma rígida oriunda da expansão da resina de poliestireno no seu processo de produção por meio do emprego um agente químico. Neste processo de expansão, são gerados gases voláteis formando pérolas de EPS aumentando seu tamanho em até cinquenta vezes (ANDRADE, 2007).

O poliestireno é relativamente fácil de funcionalizar com grupos de ácido sulfônico para produzir poliestireno sulfonado contendo até 20% mol de grupos sulfônico. O grau de sulfonação é controlado pela relação de sulfato de acetil e poliestireno na mistura reacional (MARTINS; RUGGERI; PAOLI, 2003).

O grau de sulfonação dos polímeros indica o número de grupos sulfônicos presentes por mol de polímero sulfonado. Tal parâmetro provoca variações na capacidade de troca iônica e na condutividade dos polímeros sulfonados (BECKER, 2007).

2.3.2 Pesquisas que utilizaram o poliestireno sulfonado como aditivo dispersante em sistemas cimentícios

Omena (2012) estudou a adição de poliestireno sulfonado, oriundo de copos plásticos descartados, como aditivo em argamassas em teores de 0,0; 0,2; 0,6; 1.0 e 1,4 % em relação à massa de cimento. Por meio de análises foi possível afirmar que o estudo encontrou indicativos de que o uso do poliestireno sulfonado na argamassa diminui a massa específica, o módulo estático de elasticidade e a absorção de água por capilaridade. Por outro lado, notaram-se indicativos de que são majorados os índices de consistência e de vazios, retenção de água (até o ponto de saturação), a absorção de água, as resistências à tração na flexão, a resistência à compressão e por último, um aumento considerável a resistência potencial de aderência à tração.

Souza (2012) transformou o poliestireno expandido em polieletrólito estabilizado (poliestireno sulfonado de sódio - PSSNa) para ser usado em pasta de cimento e argamassa, a fim de avaliar seu desempenho como dispersante de sistemas cimentícios, confirmando seu potencial como aditivo no concreto. O estudo mostrou

que a modificação de EPS pós-consumo a partir da reação de sulfonação realizada foi eficiente com relação à produção de um polietrólito com máximo grau de modificação, dentro das condições estudadas, e quais as variáveis que mais influenciam na reação. Por outro lado, o produto com máximo grau de modificação (mais passível de interação com o cimento) não se mostrou eficiente como dispersante de sistemas cimentícios, causando a diminuição da plasticidade e das resistências mecânicas avaliadas.

Royer et al. (2005) investigaram o uso do Poliestireno sulfonado (PSSNa), produzido a partir de copos plásticos descartáveis de Poliestireno (PS), como aditivo em argamassas e concretos de cimento Portland CPV32. Foi observado, em argamassas com relação água/cimento (a/c) de 0,48, um aumento na fluidez com o aumento das porcentagens de PSSNa (0,25 a 1,00%). A adsorção do PSSNa sobre as partículas de cimento melhora a dispersão dos componentes da argamassa, aumentando a resistência mecânica à compressão dos corpos de prova após a cura. A aplicação do PSSNa em concreto apresentou o mesmo efeito. O abatimento do concreto sem PSSNa foi de 50 mm, atingindo cerca de 200 mm com o uso do polieletrólito.

Araújo, Freire e Tello (2013) sintetizaram, a partir de copos plásticos usados de poliestireno, um aditivo tipo superplastificante com propriedades de redução da quantidade de água para a produção da argamassa. A partir do ensaio de índice de consistência, conclui-se que o fluidificante sintetizado tornou a argamassa plástica, porém com o uso de uma alta concentração (6% em peso do cimento), o que pode ser consequência do rendimento baixo da reação de síntese. Foi constatado que é necessário fazer melhorias no processo de síntese como, por exemplo, aumentar a quantidade de copos plásticos utilizados, a fim de aumentar o rendimento da reação (aumentar o grau de sulfonação) e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do aditivo sintetizado.

Amianti e Botaro (2008) desenvolveram novas técnicas para o tratamento de superfícies de concreto pré-fabricado, utilizando como impermeabilizante o poliestireno expandido reciclado (EPS), solubilizado em uma mistura de solventes. Os resultados da eficiência do tratamento, pela análise da cinética de absorção de água demonstraram-se positivos para os corpos de prova tratados, tanto com 5 como com 10% de EPS. A profundidade de penetração da impregnação foi satisfatória para ambos os tratamentos (5 e 10% de EPS). Porém, a penetração foi mais eficiente

utilizando-se a solução a 5% de EPS. O aumento da concentração de EPS na solução aumenta a viscosidade do meio impregnante e diminui a penetração do polímero nas camadas mais internas do concreto. Por outro lado, soluções mais viscosas aumentam a impregnação superficial diminuindo excessivamente a penetração de água ou mesmo dificultando a liberação de moléculas de água mais internas do concreto.

2.4 Durabilidade do concreto

Durabilidade define-se como a capacidade do concreto de preservar as características estruturais, fixadas pelo projetista, ao longo do tempo; portanto, desempenha um papel fundamental na determinação da vida de serviço das estruturas. Ela depende tanto das propriedades do concreto quanto das condições ambientais. A composição química do cimento e agregados, a microestrutura das pastas endurecidas, a composição química do ar, da água e do solo em torno do concreto, e as variações de temperatura são os principais fatores que afetam a durabilidade do concreto (MASSAZZA, 1998).

Muitos dos problemas que existem em estruturas de concreto tem resultado da falta de conhecimento sobre os fatores que afetam sua durabilidade, bem como a incapacidade de aplicar o conhecimento existente. Uma lacuna crítica em nossa compreensão é relativa a microestrutura com propriedades macroscópicas (SHAH, 1995).

O concreto é material obrigatoriamente poroso, os vazios presentes são devido ao excesso de água de mistura necessária à obtenção de trabalhabilidade conveniente, diminuição de volume absoluto que acompanha a hidratação dos constituintes do cimento, ar eventualmente arrastado durante a operação de mistura, e fissuras de diversas origens, térmicas, de retração, mecânica, etc. (OLIVEIRA, 2000b).

As falhas mais comuns de durabilidade em um clima exterior são devido à corrosão das armaduras ou ataque de geadas. Em ambientes especiais, o concreto pode sofrer ataque químico por várias substâncias, tais como sulfatos, ácidos, etc. causando desintegração ou expansão. Também pode ocorrer falha de durabilidade por causa da expansão interna dos constituintes do concreto que incham, geralmente por causa de um produto de reação na absorção de água (NILSSON, 2003).

Muitos mecanismos de deterioração dependem da passagem de líquidos ou gases através da estrutura de poros do concreto. Alcançar um concreto menos "permeável" é um, se não o principal objetivo quando tenta-se obter durabilidade. O principal meio de fazer isso é produzindo um concreto com baixa relação água/cimento. Na produção do concreto os efeitos de alta temperatura, a trabalhabilidade inicial e a taxa a que a trabalhabilidade é perdida cria uma tentação de adicionar mais água na mistura (KAY, 2003).

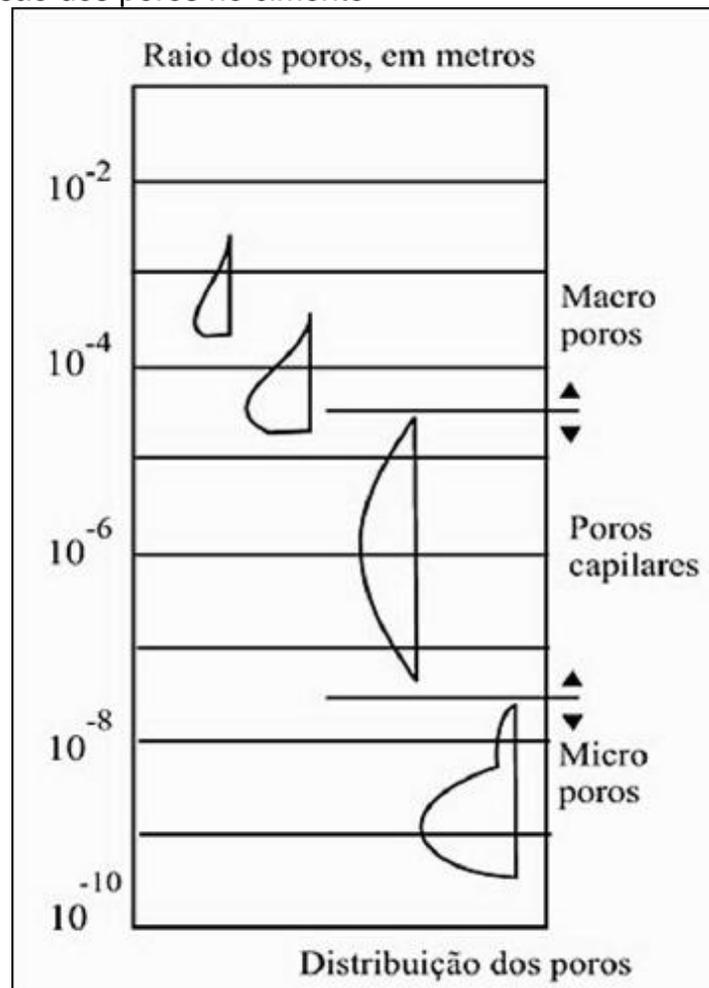
Em termos de durabilidade nas estruturas de concreto, e para além das questões ligadas com sua resistência mecânica, a palavra-chave relacionada ao material é a água. A relação a/c rege as principais características como densidade, compactidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade e fissuração, em resumo são os indicadores de qualidade do material, primeiro passo para a classificação de uma estrutura com durável ou não (SOUZA; RIPPER, 1998).

2.4.1 Porosidade

De acordo com Hooton e El-Dieb (1995), os principais problemas de durabilidade, tais como a corrosão das armaduras de reforço, danos por congelamento da água nos poros, ataques por ácidos e sulfatos, e fissuração devido à reação álcali-agregado durante a hidratação, são evitados ao controlar a penetrabilidade de fluidos através do sistema de poros no concreto.

A distribuição da porosidade em função da dimensão dos poros influencia diretamente no fluxo de transporte. Os poros do cimento são de vários tamanhos, podendo ser classificados como macroporos, poros capilares ou microporos conforme a Figura 5, sendo os dois primeiros demasiadamente importantes quanto à durabilidade (SOUZA; RIPPER, 1998).

Figura 5 - Dimensão dos poros no cimento



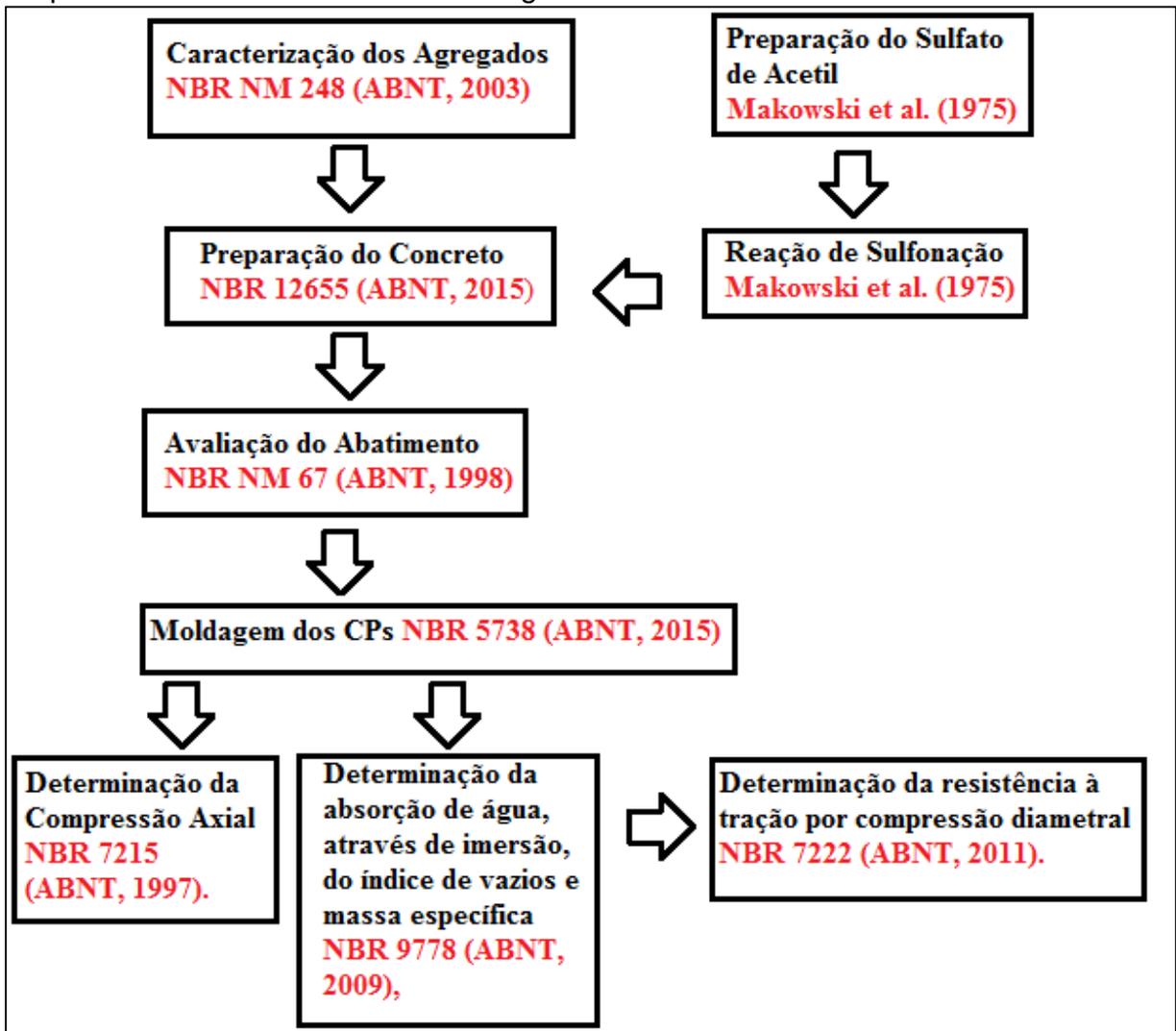
Fonte: Souza e Ripper (1998, p. 36)

O grau de saturação dos poros e sistema de fissuras terão um efeito significativo na permeabilidade. Se um dos líquidos em si (água) não saturar o sistema completamente, partes vazias serão preenchidas com outro fluido (ar) e irão bloquear parte do fluxo de fluido. Se o grau de saturação é baixo, o fluido pode ser desconectado, deixando "ilhas" de fluidos que constituem nenhum, ou pequenos, caminhos de fluidos. A pressão do fluido pode ser negativa quando o líquido não saturar o concreto, dando a sucção de líquido que criará gradientes de pressão e permeabilidade. Isso é chamado de sucção capilar (NILSSON, 2003).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os métodos e materiais que foram utilizados no desenvolvimento da pesquisa científica. O Esquema 1 mostra, de forma simplificada, a organização dos procedimentos metodológicos.

Esquema 1- Procedimentos metodológicos



Fonte: elaboração própria

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na produção do concreto foi o CP II Z- 32 da Votoran, suas especificações técnicas padrões constam na Tabela 1, estas são relacionadas a ensaios normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Tabela 1- Especificações técnicas do CP II Z-32

CP II-Z-32		
ENSAIOS FÍSICOS		
Blaine (cm ² /g)	>2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h)	>1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h)	<10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	<12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	–	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	<5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	–	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	–	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	>10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	>20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	>32,0	NBR 7215
ENSAIOS QUÍMICOS		
Perda ao fogo (%)	<6,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	<16,0	NBR 5744
Trióxido de enxofre – SO ₃ (%)	<4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre – CaO Livre (%)	–	NBR 7227
Óxido de magnésio – MgO (%)	<6,5	NBR 9203
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	–	NBR 9203
Óxido de silício – SiO ₂ (%)	–	NBR 9203
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	–	NBR 9203
Óxido de cálcio – CaO (%)	–	NBR 9203
Equivalente alcalino (%)	–	–

Fonte: Votorantim Cimentos (2015)

3.1.2 Agregados

Os agregados miúdos e graúdos foram caracterizados como prescreve a NBR NM 248 (ABNT, 2003), as britas utilizadas apresentam diâmetro máximo nominal de 25mm, já a areia foi a fina. A determinação da composição granulométrica dos agregados foi realizada com auxílio de peneiras de malha metálicas e uma balança.

O agregado miúdo foi coletado conforme a NBR NM 26 (ABNT, 2009). Depois de umedecido, e cuidadosamente misturado, formou-se duas amostras para o ensaio,

de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001). Observa-se que a massa para cada amostra foi de 2,5kg e que elas foram secas na estufa à 105°C por 24h. Após este período, foram esfriadas a temperatura ambiente e determinou-se as massas secas de cada amostra (m_1 e m_2), cada uma com a metade da massa total ensaiada.

A primeira amostra de agregado miúdo (m_1) foi ensaiada enquanto a m_2 ficou reservada. As peneiras (Figura 6) foram previamente limpas e encaixadas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, sendo que a última teve um fundo adequado. A seguir, a porção da amostra m_1 foi colocada na peneira superior do conjunto, não excedendo seu volume, e o conjunto de peneiras foi agitado manualmente por um tempo razoável.

Figura 6 - Conjunto de peneiras para agregado miúdo



Fonte: elaboração própria

A massa total de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto foi medido com auxílio de uma balança de precisão. Nesse sentido, o material da amostra foi inserido no conjunto até completar a primeira amostra. Ao final de todas as pesagens verificou-se o somatório de todas as massas, o valor não excedeu o limite de 0,3% inferior ou superior a m_1 . O peneiramento procedeu exatamente o

mesmo para a segunda amostra, de massa m_2 , e para o agregado graúdo, este também dividido em duas amostras.

A Tabela 2 exibe, para o agregado miúdo, as aberturas de malhas das peneiras utilizadas no ensaio e as massas retidas da amostra pesadas.

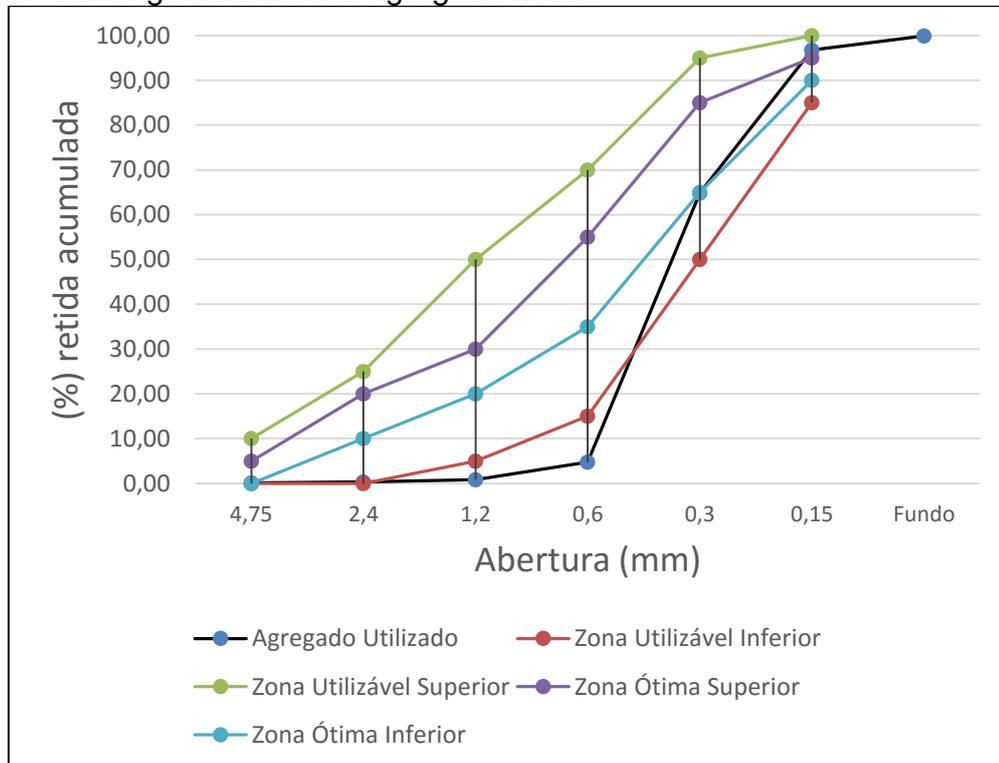
Tabela 2- Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Abertura (mm)	Massa retida (g)	(%)retida	(%) retida acumulada
4,75	6,5	0,13	0,13
2,4	9,5	0,19	0,32
1,2	25	0,50	0,82
0,6	196,2	3,92	4,74
0,3	3004,1	60,08	64,83
0,15	1595,4	31,91	96,73
Fundo	159,4	3,19	99,92

Fonte: elaboração própria

O Gráfico 1 mostra a curva granulométrica da porcentagem de massa retida acumulada. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), o agregado miúdo possui a dimensão máxima característica de 0,6mm e módulo de finura de 1,67.

Gráfico 1- Curva granulométrica agregado miúdo



Fonte: elaboração própria

De acordo com o Gráfico 1, a porcentagem retida acumulada do agregado miúdo encontra-se próxima a zona utilizável inferior com módulo de finura entre 1,55 e 2,20.

A Tabela 3 expõe, para o agregado graúdo, as aberturas de malhas das peneiras utilizadas no ensaio e as massas retidas da amostra pesadas.

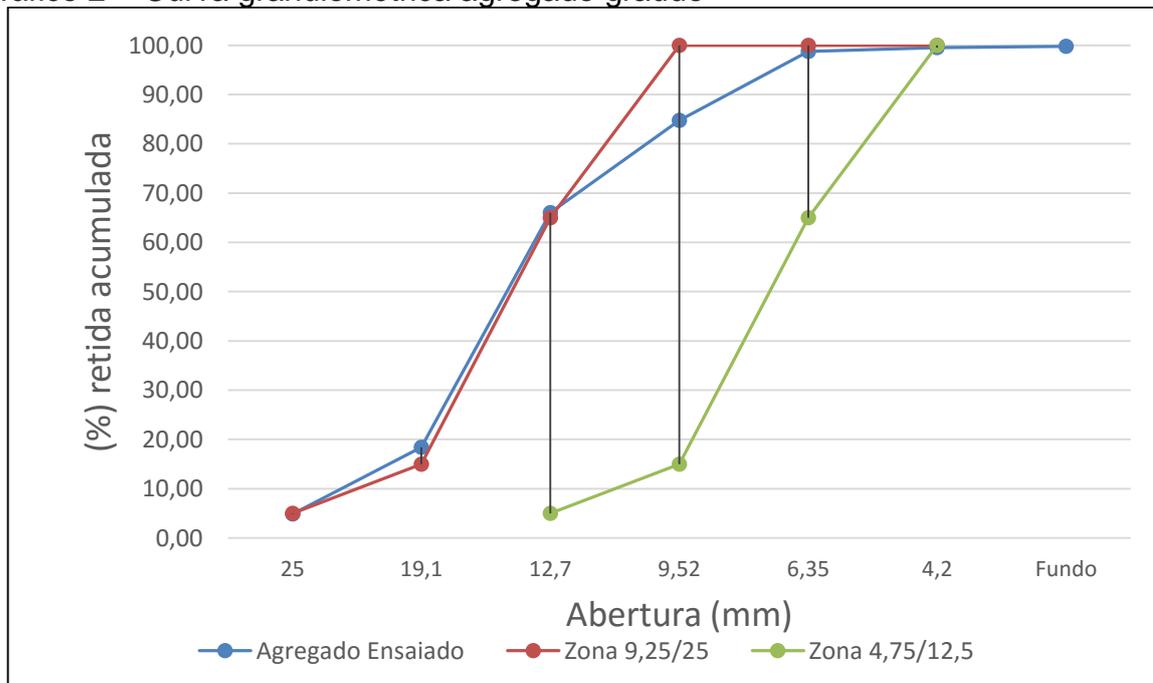
Tabela 3 - Distribuição granulométrica agregado graúdo

Abertura (mm)	Massa retida (g)	(%)retida	(%) retida acumulada
25	242	4,84	4,84
19,1	677,7	13,55	18,39
12,7	2383,4	47,67	66,06
9,52	935,9	18,72	84,78
6,35	699	13,98	98,76
4,75	38,3	0,77	99,53
Fundo	14	0,28	99,81

Fonte: elaboração própria

O Gráfico 2 exibe a curva granulométrica da porcentagem de massa retida acumulada. Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), o agregado graúdo possui a dimensão máxima característica de 25mm e módulo de finura 3,67.

Gráfico 2 - Curva granulométrica agregado graúdo



Fonte: elaboração própria

De acordo com o Gráfico 2, a porcentagem retida acumulada do agregado graúdo aproxima-se da zona granulométrica 9,25/25.

3.1.3 Poliestireno

O poliestireno expandido foi coletado de estabelecimentos comerciais da cidade de Alegrete, o material fora descartado após ser utilizado para proteger eletrodomésticos em seu transporte. Com auxílio de um estilete, o EPS foi cortado em fragmentos com a largura não excedendo 30mm como é ilustrado na Figura 7.

Figura 7- Poliestireno expandido coletado



Fonte: elaboração própria

3.1.4 Agentes e Reagentes

Os agentes e reagentes utilizados nas reações químicas foram:

- a) 1,2-dicloroetano ($C_2H_4Cl_2$)
- b) Anidrido acético ($C_4H_6O_3$)
- c) Nitrogênio líquido (N_2)
- d) Álcool etílico (C_2H_6O)
- e) Ácido sulfúrico (H_2SO_4)

3.2 Métodos

3.2.1 Modificação química do poliestireno expandido em sulfonado

O procedimento experimental para transformar o poliestireno expandido em poliestireno sulfonado para ser utilizado como superplastificante ocorreu em duas etapas. A primeira foi a preparação da solução sulfato de acetil e em seguida a sulfonação do EPS por meio de reações químicas. Os métodos utilizados nos processos é uma adaptação de Makowski, Lundberg e Singhal (1975) e Bruno e Marcones (2006).

3.2.1.1 Preparação do Sulfato de Acetil

Todas as reações foram preparadas no interior de uma capela devido ao solvente e demais reagentes serem muito voláteis, especialmente a temperaturas maiores que a ambiente. O sulfato de acetil ($C_2H_4O_5S$) foi obtido misturando 118,71ml de 1,2-dicloroetano com 22,89ml de anidrido acético em um copo Becker de 250ml. A solução foi resfriada à temperatura de $-10^\circ C$ imersa em um copo de 2000ml com cubos de gelo e água segundo ilustra a Figura 8.

Figura 8- Solução de sulfato de acetil resfriada



Fonte: elaboração própria

Enquanto a solução de sulfato de acetil mantinha-se resfriada, cuidadosamente foi adicionado 25,2ml de ácido sulfúrico de 97% com auxílio de uma pipeta com bulbo (Figura 9). A mistura de reação foi agitada até obter-se uma solução homogênea e clara mantendo-se a mesma temperatura de resfriamento.

Figura 9- Adição de ácido sulfúrico

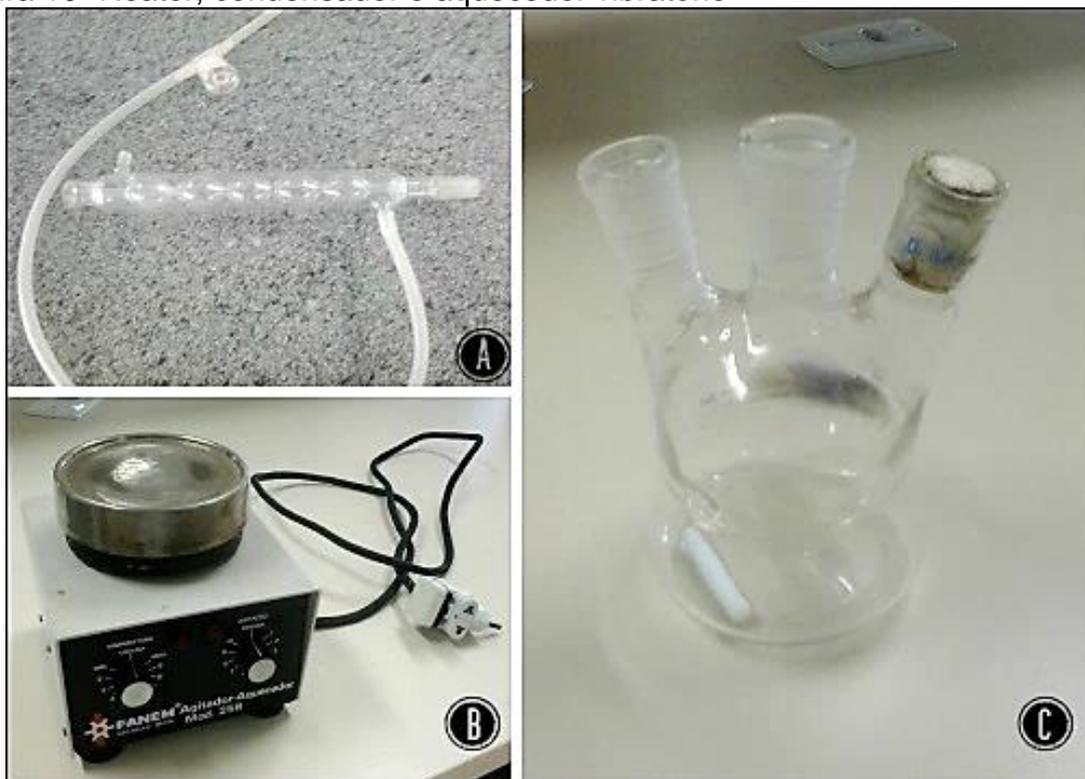


Fonte: elaboração própria

3.2.1.2 Reação de sulfonação

O aparato para a reação foi constituído por um reator (Figura 10c) de 3 bocas equipado com condensador (Figura 10a) e aquecedor vibratório (Figura 10b).

Figura 10- Reator, condensador e aquecedor vibratório



Fonte: elaboração própria

O aparato foi montado no interior da capela com uma mangueira interligando uma torneira ao condensador, este procedimento é necessário para tornar líquido novamente os gases que venham a escapar do reator induzindo seu contato com água a temperatura ambiente.

A reação iniciou-se dissolvendo 30 gramas de poliestireno expandido previamente cortado em 237,3ml de 1,2-dicloroetano. A Figura 11 ilustra a dissolução do EPS ao entrar em contato com o solvente no interior do reator.

Figura 11- Dissolução do EPS no aparato completo para a reação



Fonte: elaboração própria

Após a dissolução do EPS, com auxílio de um medidor digital, a temperatura de aquecimento da solução foi calibrada, esta foi estabelecida em 55°C (Figura 12).

Figura 12- Calibração da temperatura



Fonte: elaboração própria

Posteriormente a calibração da temperatura ao fixar o aquecedor em 55°C, nitrogênio foi purgado por 60 minutos, no qual o procedimento pode ser observado na Figura 13.

Figura 13- Nitrogênio sendo purgado na solução



Fonte: elaboração própria

A seguir, foi adicionado usando uma pipeta com bulbo, 6ml do sulfato de acetil previamente preparado e ainda com a temperatura de -10°C . A partir desse momento a solução alterou sua coloração tornando-se marrom clara (Figura 14).

Figura 14- Adição do Sulfato de Acetil



Fonte: elaboração própria

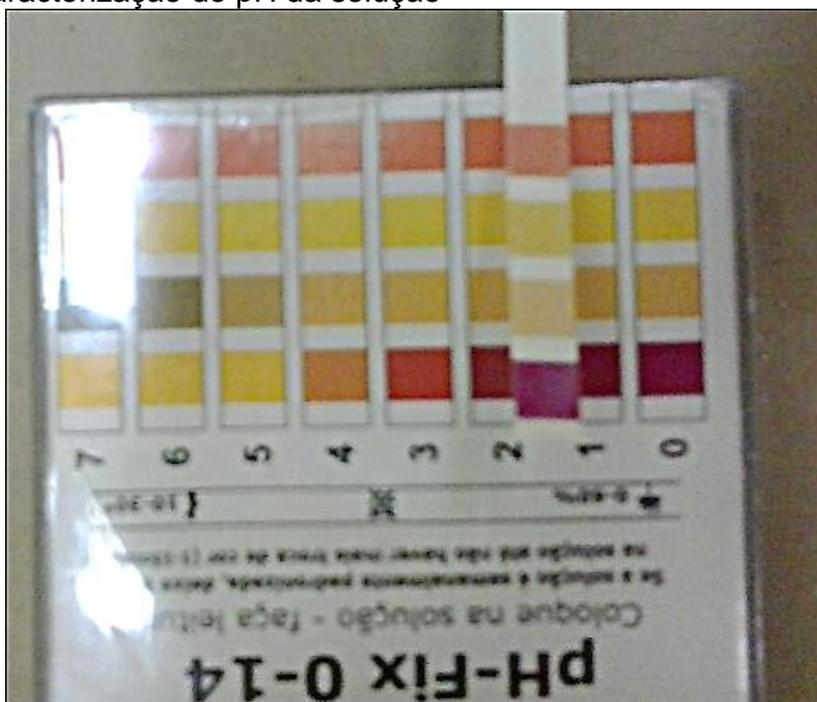
A solução foi agitada durante 2 horas a temperatura de aquecimento até ser terminada pela adição de 30 ml de 2-propanol (álcool isopropílico). Posteriormente, o poliestireno (nesse instante já sulfonado) foi reservado por 24h a temperatura ambiente.

3.2.2 Caracterização do aditivo

O aditivo produzido foi caracterizado analisando-o físico-quimicamente através da cor e pH. A cor foi analisada visualmente como de aspecto marrom claro e o pH foi

medido com fitas de pH em triplicata usando fenolftaleína como indicador. Após as 24h de repouso, a solução adquiriu um pH de 2 (Figura 15) caracterizando-se como uma solução ácida.

Figura 15 -Caracterização do pH da solução



Fonte: elaboração própria

3.2.3 Determinação do concreto de referência

A avaliação da influência do aditivo no concreto partiu de um concreto de referência com os requisitos de acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2011), do qual, foi adicionado o poliestireno expandido sulfonado com diferentes porcentagens em relação a massa de cimento. Dessa forma, a relação água/cimento foi reduzida para atingir a mesma consistência do concreto de referência. A consistência exigida partiu da Tabela 4 expressa na norma.

Tabela 4 - Requisitos para concreto de referência

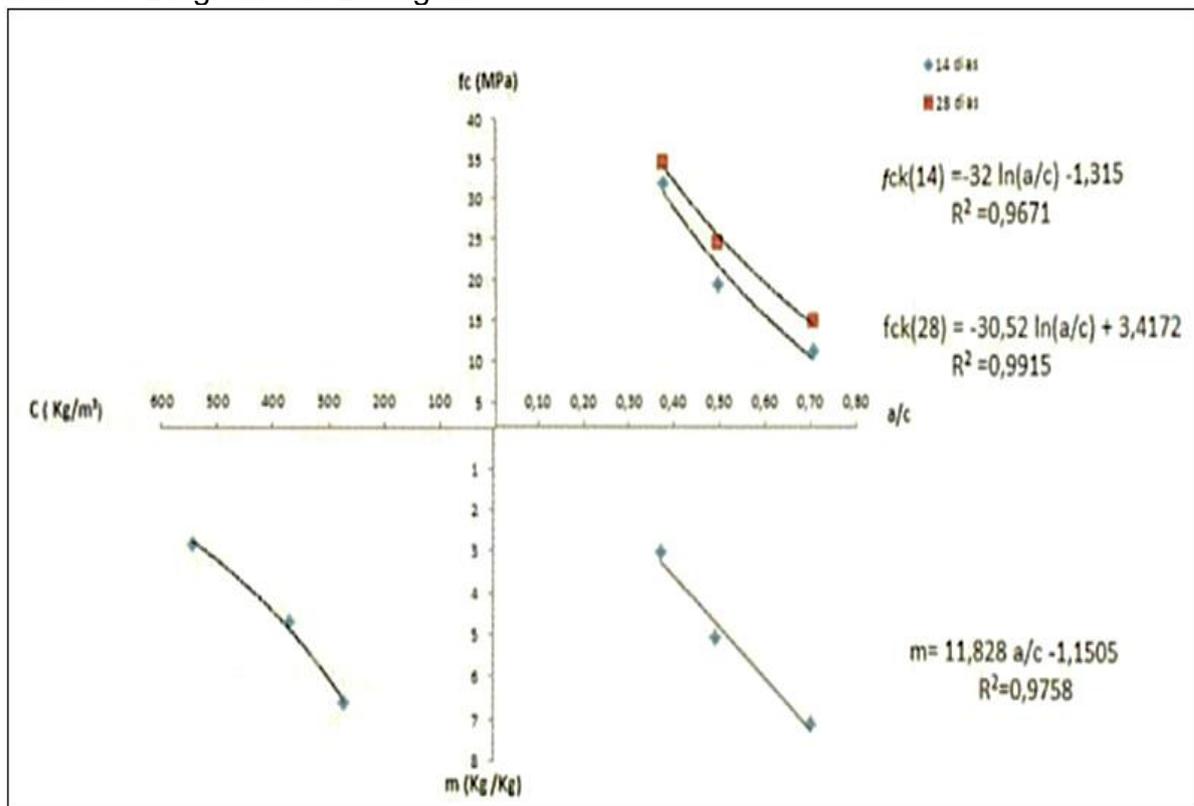
Concreto de referência	Conteúdo de cimento (kg/m ³)	Consistência do concreto de referência (controle – sem aditivo) Abatimento (mm)	Aditivo
I	350 ± 10	100 ± 20	Superplastificante (ensaios com redução de água mantendo a consistência)

Fonte: adaptado de NBR 11768 (ABNT, 2011)

3.2.3.1 Determinação do traço de referência

A determinação do traço de referência partiu do diagrama de dosagem (Gráfico 3) produzido em ensaios realizados na Universidade Federal do Pampa na disciplina de Materiais de Construção Civil III utilizando o Método IPT. A resistência característica aos 28 dias determinada para a dosagem foi de 25MPa.

Gráfico 3- Diagrama de Dosagem



Fonte: UNIPAMPA (2015)

Neste ensaio foi escolhido três diferentes traços (1: m) em massa seca de cimento, onde m é a relação agregado seco/cimento em massa, assim foram determinados os traços (1: 3), (1: 5) e (1: 7). Posteriormente, obteve-se o conteúdo de teor seco ideal (α) de 52% e a resistência dos corpos-de-prova de concreto endurecido, dessa forma construiu-se o diagrama.

Ao entrar com o valor da resistência característica de 25MPa na equação obtida a partir dos dados, definiu-se uma relação água/cimento de 0,5kg/kg. A relação agregado seco/cimento adquirida foi de 4,66kg/kg e, a partir do teor ideal, determinou-se uma relação agregado graúdo seco/cimento de 2,72kg/kg e de agregado miúdo seco/cimento de 1,94kg/kg.

Dessa forma o traço final em kg/kg foi de 1:1,94:2,72:0,492 e o consumo de cimento de 387 kg/m³. A partir do consumo e o volume necessário para 8 CPs, obteve-se para, cada betonada, 5,8kg de cimento, 11,25kg de agregado miúdo, 15,77 kg de brita e 2,92kg de água.

3.2.4 Preparação do concreto

O preparo do concreto foi realizado segundo a norma NBR 12655 (ABNT, 2015), sendo que as misturas ocorreram em uma betoneira. O cimento, água, aditivo, agregado graúdo e miúdo foram medidos em massa. As demais misturas de ensaio tiveram a mesma razão agregado/cimento que a mistura de referência, porém, a relação água/cimento foi ajustada para se obter a consistência dentro dos limites da Tabela 4 para um poliestireno sulfonado com determinada porcentagem em relação a massa de cimento.

Após o umedecimento da betoneira, foi adicionado na seguinte ordem, agregado graúdo (100%) e água (60%), desta forma foi misturado por 1min. Em seguida, agregado miúdo (100%); cimento (100%) e aditivo superplastificante (100%). Logo após cinco minutos de mistura, a água restante foi adicionada aos poucos até o concreto adquirir a consistência de referência.

As porcentagens de aditivos da amostra foram 0,5; 1,0 e 1,5% em relação a massa de cimento, já o conteúdo de água foi inserido até a amostra atingir a consistência do concreto de referência, ou seja, 100 ± 20 mm. O concreto de referência foi identificado como CR, com 0,5% de aditivo como CV, com 1,0% como

CX e o de 1,5% como CXV. O quantitativo dos materiais encontra-se expresso na Tabela 5.

Tabela 5- Quantitativo dos materiais

Concreto	Aditivo (%)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	Relação a/c (kg/kg)
CR	0	5,8	11,25	15,77	2,92	0	0,503
CV	0,5	5,8	11,25	15,77	2,67	0,029	0,46
CX	1	5,8	11,25	15,77	2,87	0,058	0,495
CXV	1,5	5,8	11,25	15,77	2,92	0,087	0,503

Fonte: elaboração própria

3.2.5 Avaliação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

Assim que a mistura foi finalizada, a consistência do concreto foi avaliada pelo abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). O molde, haste de compactação e placa de base para utilização no ensaio foram metálicos, todos foram umedecidos para evitar adesão de água do concreto.

Antes do molde ser preenchido pelo concreto, o operador posicionou-se com os pés sobre suas aletas para manter-se estável. O molde foi enchido rapidamente com o concreto coletado conforme a NBR NM 33 (ABNT, 1998), tal material foi retirado completamente da descarga da betoneira para dentro do recipiente de amostragem, procedendo cuidadosamente para não restringir o fluxo de concreto evitando a segregação de seus componentes.

O molde foi preenchido em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde à ser compactado. Cada camada foi compactada com 25 golpes da haste de compactação, os golpes foram distribuídos uniformemente na seção da camada. Na camada inferior, metade dos golpes foram em formato espiral até o centro com a haste inclinada, já nas demais os golpes penetraram até a camada anterior. A superfície foi rasada com uma espátula em movimentos rolantes.

Seguidamente, o molde foi retirado cuidadosamente na direção vertical em um tempo de 5s a 10s. Após a retirada do molde, mediu-se o abatimento determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova, que corresponde à altura média do corpo-de-prova desmoldado, aproximando aos 5 mm mais próximos. A medição da consistência nota-se na Figura 16.

Figura 16- Medição da consistência



Fonte: elaboração própria

3.2.6 Moldagem e desmoldagem dos corpos-de-prova

Depois de cada concreto ter sua consistência determinada pelo abatimento do tronco de cone, moldou-se os corpos-de-prova cilíndricos. Os CPs têm dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2015). O adensamento foi manual realizado em 2 camadas de 12 golpes cada. Após 24h, os CPs foram desmoldados e identificados com seu respectivo teor de aditivo como observa-se na Figura 17.

Figura 17- Corpos-de-prova desmoldados e identificados



Fonte: elaboração própria

A Tabela 6 mostra a quantidade de CPs cilíndricos que foram moldados para os concretos produzidos na pesquisa científica.

Tabela 6- Quantidade de corpos-de-prova

Porcentagem de Aditivo (%)	Quantidade de CPs	
	Compressão Axial	Imersão
0	4	4
0,5	4	4
1,0	4	4
1	4	4

Fonte: elaboração própria

3.2.7 Determinação da resistência à compressão axial

O procedimento para a determinação da resistência à compressão axial foi minuciosamente seguido pela NBR 7215 (ABNT, 1997). A idade avaliada foi aos 28 dias, onde obteve-se quatro CPs curados de forma submersa até a realização do ensaio. As superfícies rugosas da parte superior dos corpos-de-prova foram levadas a retificadora (Figura 18c) para planificá-las.

A resistência à compressão axial nos corpos-de-prova foi medida na Máquina Universal para ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão (Figura 18a) ligada a uma célula de carga para transmissão dos dados obtidos na compressão (Figura 18b).

Figura 18- Máquina Universal para ensaio de compressão



Fonte: elaboração própria

3.2.8 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Devido à ausência de uma norma brasileira para ensaio de tração direta, tal propriedade foi avaliada por meio da compressão diametral de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011). As amostras consistiram em quatro corpos-de-prova cilíndricos para cada porcentagem de aditivo resultantes do ensaio da absorção de água com dimensões de 200mm de altura e 100mm de diâmetro.

Foi traçado, em cada extremidade do corpo-de-prova, uma linha diametral, de modo que as duas linhas resultantes fiquem contidas no mesmo plano axial. O corpo-de-prova foi colocado de forma que o plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas, que recebem o carregamento, coincidissem com eixo de aplicação da carga.

As duas tiras de madeira foram colocadas entre os pratos da máquina e os corpos-de-prova como ilustra a Figura 19, os pratos foram ajustados até que fosse obtida uma compressão capaz de manter em posição o CP. A carga foi aplicada continuamente e sem choques, com crescimento constante de tração até a ruptura do corpo-de-prova.

Figura 19- Máquina para ensaio em compressão diametral



Fonte: elaboração própria

3.2.9 Determinação da absorção de água, através de imersão, do índice de vazios e massa específica

A fim de avaliar o efeito do aditivo na redução dos poros do concreto foi realizado, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009), um ensaio para determinar a absorção de água, através da imersão, o índice de vazios e a massa específica do concreto. A amostragem consistiu-se na coleta de quatro corpos-de-prova com dimensões 10x20cm curados de forma submersa até a idade de 28 dias.

As amostras foram colocadas na estufa e mantidas à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 72h, ao término desse período foi medida a massa seca da amostra (m_s). Posteriormente a pesagem, os corpos-de-prova foram imersos em água a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ por mais 72h como observa-se na Figura 20.

Figura 20- Corpos-de-prova imersos em água à 23°C



Fonte: elaboração própria

Completada a etapa de saturação, as amostras foram imersas em um com água levada à ebulição (Figura 21), o processo começou depois de 15min e antes de 30min da imersão. A ebulição manteve-se por 5h e, ao término desse tempo, a água esfriou naturalmente até atingir temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Figura 21- Corpos-de-prova imersos em fervura



Fonte: elaboração própria

Assim que alcançou a temperatura ambiente, a massa de cada CP prismático imerso em água após a fervura (m_i) foi medida com auxílio de uma balança hidrostática ilustrado na Figura 22. A temperatura ambiente na data do ensaio estava em 24°C.

Figura 22- Determinação da massa dos CPs na balança hidrostática



Fonte: elaboração própria

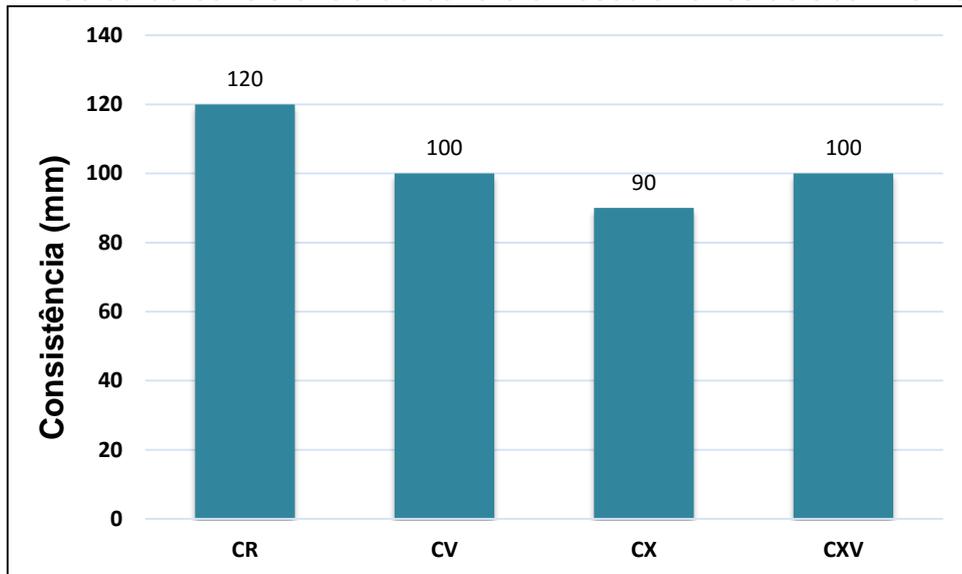
Em seguida, os concretos foram retirados da água, enxugados com pano úmido e pesados obtendo a massa da amostra saturada em água após a imersão e fervura (m_{sat}).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Consistência

Os valores obtidos no ensaio de consistência para os concretos com e sem o poliestireno sulfonado como aditivo encontram-se no Gráfico 4.

Gráfico 4- Medida de consistência do concreto fresco através do abatimento



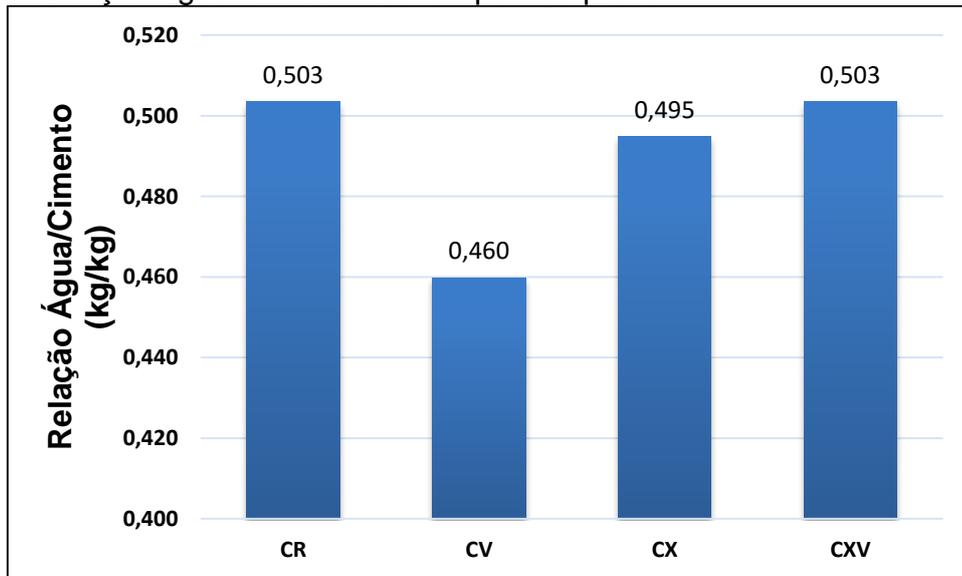
Fonte: elaboração própria

A consistência final dos concretos com o aditivo químico respeitou a tolerância de $100 \pm 20\text{mm}$. Para controlar essa diferença foi necessário, à medida que a quantidade de água do concreto de referência era inserida, analisar visualmente a consistência e realizar o ensaio de abatimento do tronco de cone mais de uma vez.

4.2 Relação a/c

O Gráfico 5 mostra a relação final entre a água e o ligante para os concretos produzidos na pesquisa.

Gráfico 5- Relação água/cimento dos Corpos-de-prova



Fonte: elaboração própria

O concreto CV com 0,5% de aditivo químico, para chegar na consistência de referência de $100 \pm 20\text{mm}$, teve uma redução de 8,67% da água utilizada no concreto sem o poliestireno sulfonado. Para o CX, com 1,0% de teor de aditivo, uma redução de 1,71% de água em relação ao CR foi alcançada. Logo, o concreto CXV, com 1,5% de aditivo em relação a massa de cimento, não apresentou alteração na quantidade de água necessária para atingir a consistência de referência no ensaio.

4.3 Ensaio de compressão axial

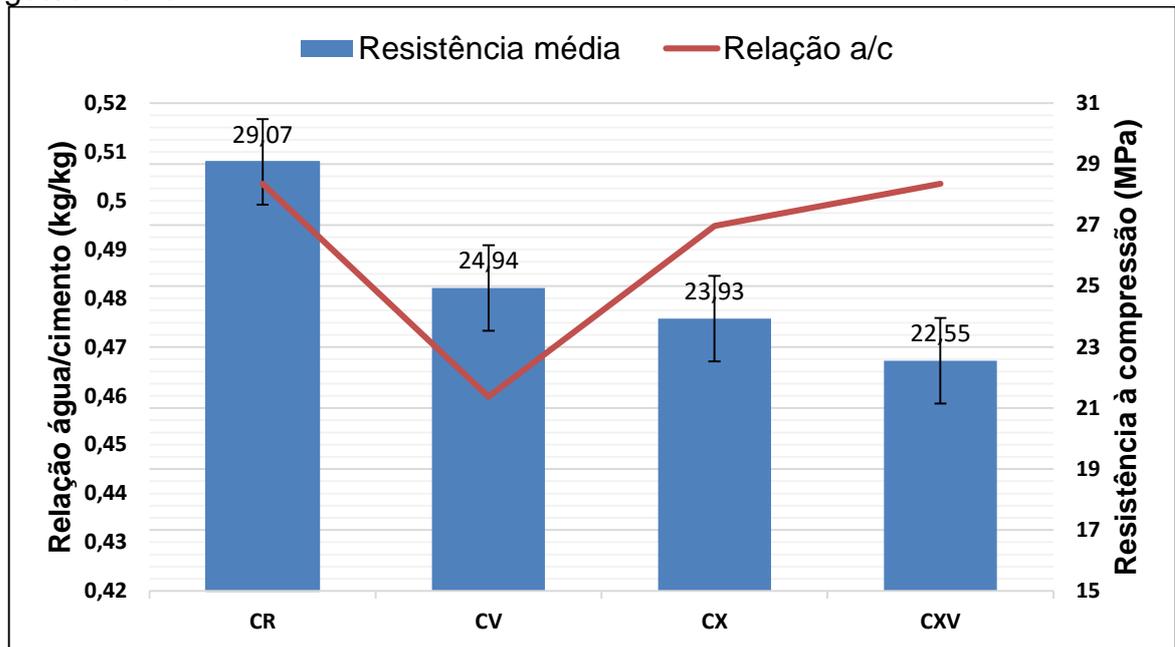
O cálculo da capacidade resistente por compressão axial dos concretos cilíndricos curados aos 28 dias foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) e está expresso na Equação 1.

$$f_{cd} = \frac{4F}{\pi D^2} \quad \dots (1)$$

Onde f_{cd} define-se como a resistência à compressão, D o diâmetro em mm e F a força máxima alcançada em newtons na Máquina Universal. A força máxima de todos os CPs ensaiados nesta pesquisa por compressão axial pode ser vista no Apêndice A.

O Gráfico 6 exhibe a média das resistências à compressão axial dos concretos sem e com poliestireno sulfonado utilizado como aditivo superplastificante e a relação água/cimento utilizada em cada mistura.

Gráfico 6 – Resistência à compressão axial média e aos 28 dias e relação água/cimento



Fonte: elaboração própria

Com relação a média das resistências para o concreto de referência, o Gráfico 6 mostra um valor de 29,07MPa com um desvio padrão de 0,88MPa entre as resistências dos corpos-de-prova dessa mistura. A influência de 0,5% de poliestireno sulfonado na resistência do concreto é constatada com uma resistência média de 24,93MPa e um desvio padrão de 1,29MPa, nota-se uma redução de 14,23% da resistência à compressão em relação ao concreto de referência.

Para a capacidade resistente do concreto produzido com 1% do aditivo dispersante, as resistências à compressão axial alcançaram uma média de 23,93MPa e um desvio padrão de 2,89MPa entre os corpos-de-prova desta mistura. Observa-se uma redução de 17,69% da capacidade resistente à compressão em relação ao concreto de referência.

A resistência à compressão axial do CXV com 1,5% de poliestireno sulfonado em relação a massa de cimento constata uma média de 22,55MPa e um desvio padrão de 1,72MPa entre os CPs. Observando esses dados, percebe-se uma redução de 22,44% da capacidade resistente de compressão em relação ao concreto sem aditivo.

Ao avaliar a média das resistências à compressão axial dos concretos sem e com poliestireno sulfonado utilizado pode-se observar que com um aumento da porcentagem de PPS a capacidade resistente dos corpos-de-prova curados aos 28 dias obteve uma redução.

O CV e CX, com 0,5% e 1% de aditivo respectivamente, apresentaram uma redução na quantidade de água para atingir a consistência de referência como ilustra o Gráfico 6. Confirmando assim a propriedade de dispersar as partículas de cimento conforme é citado nas pesquisas de Royer et al. (2005), Omena (2012) e Souza (2012).

De acordo com Okpala (1989), Aïtcin (1998) e Pereira (2011), uma menor relação água/ligante proporciona uma maior resistência ao concreto. Neste contexto, era esperado uma maior resistência à compressão em relação àquela obtida no concreto de referência.

Através destes dados obtidos na pesquisa, constata-se que outro fator, relacionado com a composição do aditivo produzido, resultou na perda da capacidade resistente no processo de endurecimento do concreto e na perda do efeito de dispersante de partículas do concreto fresco à medida que a porcentagem de aditivo era maior na mistura.

Conforme elucida Kauppi, Andersson e Bergstrfm (2005), os superplastificantes, em sua grande maioria, são polieletrólitos adsorvidos na interface sólido-líquido que impõem forças de repulsão eliminando a floculação das partículas. A adsorção dos polietrólitos é dependente das interações eletrostáticas entre eles e a superfície das partículas. Sendo assim, a química da superfície de uma fase sólida e as propriedades da solução dos polieletrólitos são parâmetros importantes controlados pelo pH e pela força iônica.

Oliveira e Pandolfelli (2007) descreveram que a “pega” inicial do concreto pode ocorrer devido ao efeito direto da formação de fases hidratadas do ligante, mas também por efeito indireto causando aglomeração das partículas da matriz. Aditivos ácidos promovem redução da trabalhabilidade do concreto devido a afinidade desses aditivos pelos íons cálcio o que promove um aumento da dissolução das partículas de cimento gerando um aumento da força iônica do meio. O aumento da força iônica resulta na compressão da dupla camada elétrica das partículas da matriz, reduzindo a repulsão eletrostática entre as mesmas. Este efeito é acentuado devido à formação de uma camada estérica e eletrostática pouco espessa mais susceptível ao aumento da força iônica e a queda de pH quando na presença do aditivo ácido. Dessa forma, a queda de pH promove aglomeração das partículas da matriz.

O ácido sulfúrico restante das reações químicas resultou em um pH baixo do aditivo produzido do poliestireno expandido, este fator aumentou a força de atração

iônica da mistura e reduziu a capacidade dispersante do poliestireno sulfonado (adsorvido nas partículas de cimento) sendo acentuado nos traços onde sua porcentagem em relação ao cimento era mais expressiva.

Com relação a perda da resistência à compressão axial, outro fator ocorrido no endurecimento do concreto, e não relacionado com a relação água/cimento, resultou na perda da resistência nas misturas com o poliestireno sulfonado.

A influência da relação água/cimento na resistência não se constitui como uma regra, pois existe várias qualificações necessárias para a validade. A resistência com qualquer relação água/cimento depende do grau de hidratação do cimento e das suas propriedades químicas e físicas, da temperatura à qual se processa a hidratação, do teor de ar do concreto e também da variação da relação água/cimento efetiva e da formação de fissuras em virtude da exsudação (definida como um fenômeno cuja manifestação externa é o aparecimento de água na superfície após o concreto ter sido lançado ou adensado, porém antes de ocorrer a pega). Portanto, é mais correto relacionar a resistência com a concentração de produtos sólidos da hidratação do cimento no espaço disponível para eles (CRUZ, 2002).

A Tabela 7 apresenta requisitos mínimos para caracterização de um aditivo como superplastificante com alta redução de água.

Tabela 7- Requisitos para superplastificante tipo I - Ensaio mantendo a consistência do concreto

Propriedade	Método de Ensaio	Requisito
Redução de água medida pelo abatimento de tronco de cone	ABNT NBR NM 67	Concreto em ensaio com redução de água $\geq 12\%$ em relação ao concreto de referência
Resistência à compressão	ABNT NBR 5739	Aos 28 dias: resistência do concreto em ensaio $\geq 115\%$ da resistência do concreto de referência.

Fonte: adaptado de ABNT NBR NM 11768 (2011)

Como a porcentagem mínima de redução de água e o aumento mínimo da resistência não foi observado no concreto produzido, o aditivo não pode ser classificado como um superplastificante.

4.4 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral é expressa ($f_{ct,sp}$) pela Equação 2 em Megapascal.

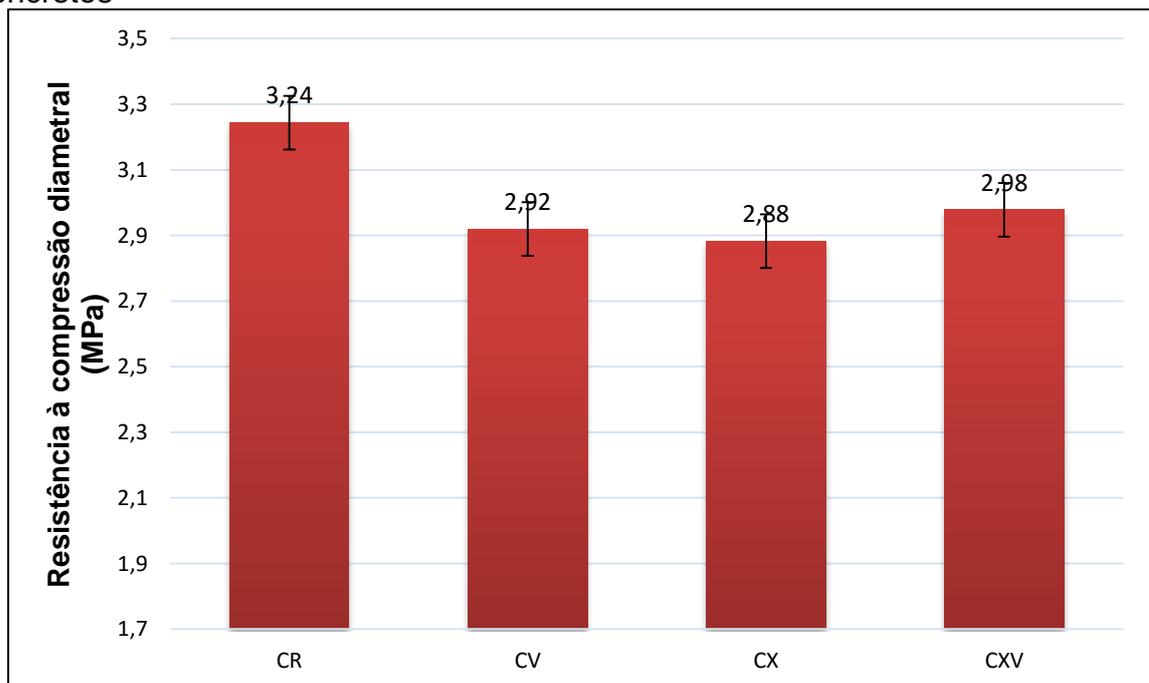
$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad \dots(2)$$

Onde F é a força máxima obtida no ensaio de compressão diametral em newton, d o diâmetro do corpo-de-prova em milímetros e l o comprimento do corpo-de-prova em mm. As forças máximas podem ser visualizadas no Apêndice D.

O Gráfico 7 exibe a média das resistências à compressão diametral de todos os corpos-de-prova utilizados nesse ensaio, o concreto de referência obteve uma maior resistência comparada aqueles com a utilização do poliestireno sulfonado como aditivo.

A dispersão entre as médias dos concretos com o aditivo não foi muito elevada, concluindo-se que o aumento da porcentagem de aditivo não teve grande alteração na tração dada pela compressão diametral. No entanto, observou-se que com o uso do aditivo a resistência à tração decresceu 9,8%.

Gráfico 7- Média das resistências à compressão diametral aos 28 dias para os concretos



Fonte: elaboração própria

4.5 Absorção de água por imersão e índice de vazios

O cálculo para determinação da absorção de água e o índice de vazios foi seguido pela NBR 9778 (ABNT, 2005) onde a absorção (A) é dada pela Equação 3 e o índice de vazios (Iv) é calculado pela Equação 4, ambos dados em porcentagem.

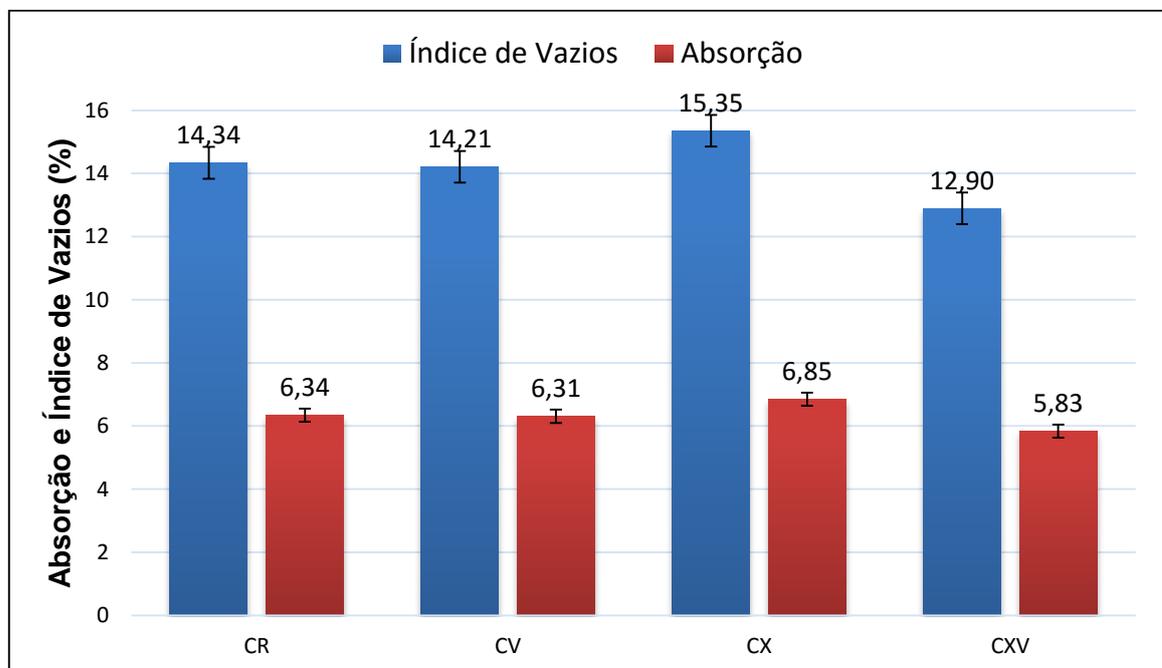
$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad \dots(3)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} * 100 \quad \dots(4)$$

Onde m_{sat} é a massa saturada em água após imersão e fervura, m_s a massa da amostra seca na estufa e m_i a massa da amostra saturada imersa em água após fervura. O valor da amostra de todas as massas neste ensaio pode ser visualizado no Apêndice B.

O Gráfico 8 expõe a porcentagem de absorção de água por imersão e o índice de vazios para os concretos curados aos 28 dias.

Gráfico 8- Absorção de água por imersão e índice de vazios para os concretos



Fonte: elaboração própria

Observou-se que a média da absorção de água para o concreto de referência foi de 6,34% com um desvio padrão de 0,23% assim como o índice de vazios obteve

uma média de 14,34% e um desvio padrão de 0,40%. Para o concreto com 0,5% de poliestireno sulfonado, calculou-se uma média de absorção de água de 6,30% com um desvio padrão de 0,39% e um índice de vazios com a média de 14,21% e um desvio padrão de 0,88%.

No concreto com 1,0% de PPS, a média da absorção de água foi de 6,85% com um desvio padrão de 0,79%. Em relação ao índice de vazios, conseguiu uma média de 15,35% e um desvio padrão de 1,36%. Com relação a porcentagem de absorção de água por imersão e o índice de vazios para o concreto com 1,5% de aditivo, nota-se que a média da absorção de água foi de 5,83% com um desvio padrão de 0,37% assim como o índice de vazios obteve uma média de 12,89% e um desvio padrão de 0,09%.

Ao analisar os dados obtidos no ensaio para o índice de vazios e absorção de água percebeu-se que para nas primeiras porcentagens de 0,5 e 1,0%, o aditivo não teve grande influência na porosidade do concreto. No entanto, com 1,5% de poliestireno sulfonado, foi percebido uma redução na quantidade de poros e conseqüente diminuição no índice de vazios e absorção de água. Em relação ao concreto de referência, a redução que 1,5% de PPS ocasionou no índice de vazios do concreto foi de 10,06% e de absorção de água de 8,02%.

4.6 Massa específica

A determinação da massa específica foi seguida pela NBR 9778 (ABNT, 2005) onde a massa específica da amostra seca (p_s) foi calculada pela Equação 5, a massa específica da amostra saturada após fervura (p_{sat}) pela Equação 6 e a massa específica real (p_r) pela Equação 7. Todos valores das massas do ensaio encontram-se no Apêndice C.

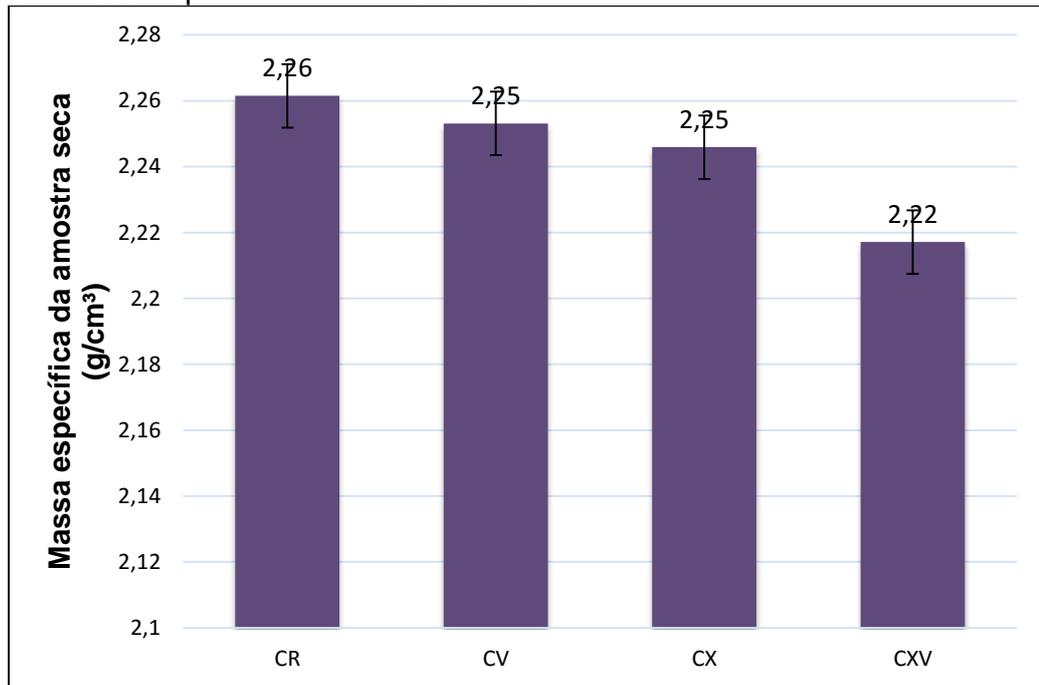
$$p_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \dots(5)$$

$$p_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \dots(6)$$

$$p_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \dots(7)$$

O Gráfico 9 mostra a média das massas específicas das amostras seca, percebe-se que um aumento da dosagem de aditivo, ocorreu uma redução da massa específica das amostras. O concreto com 1,5% de aditivo obteve uma redução de 1,96% da massa específica do concreto de referência.

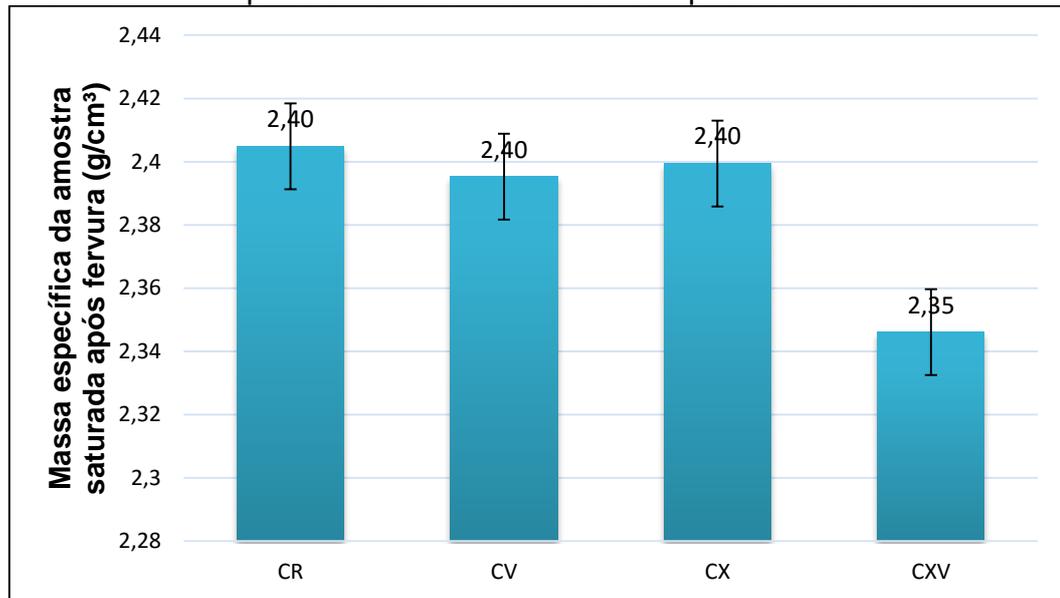
Gráfico 9- Massa específica da amostra seca média



Fonte: elaboração própria

Com relação a média das massas específicas das amostras saturada após fervura mostrada no Gráfico 10, percebe-se que o concreto com 0,5% e 1,0% de aditivo não obteve uma dispersão grande em relação ao concreto de referência. Contudo o CXV, com 1,5% de poliestireno sulfonado teve uma redução mais significativa na massa específica. Em relação a porcentagens verifica-se 2,44% em relação ao concreto de referência.

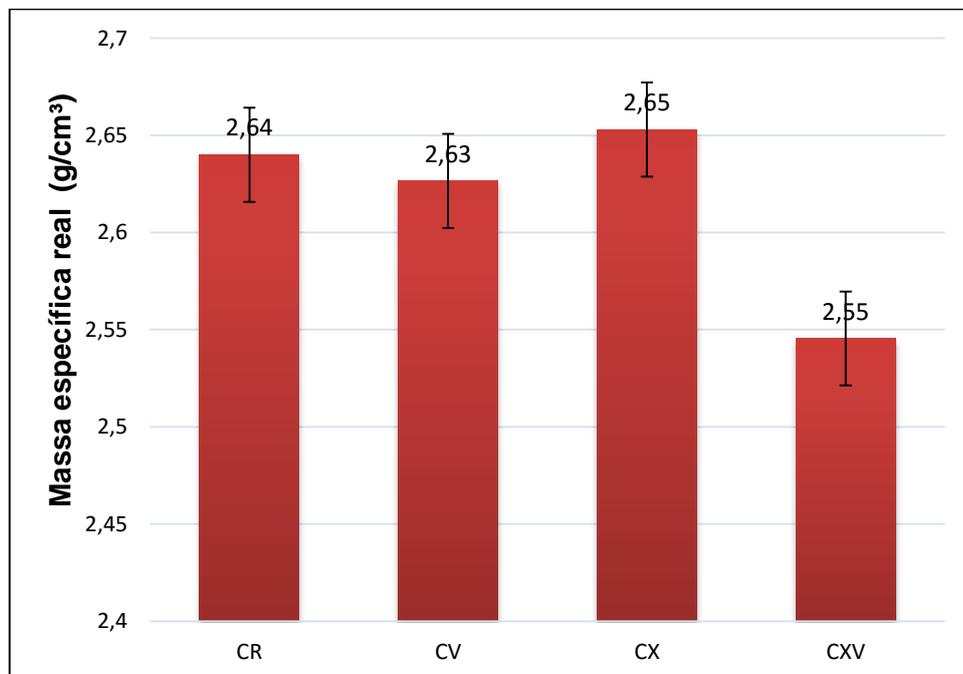
Gráfico 80- Massa específica da amostra saturada após fervura média



Fonte: elaboração própria

Comparando os valores médios das massas específicas reais expressos no Gráfico 11, observou-se uma redução na massa específica à medida que a porcentagem de poliestireno sulfonado era aumentada. O concreto com 1,5% de aditivo mostrou um decréscimo mais expressivo na massa específica real.

Gráfico 91- Massa específica real média



Fonte: elaboração própria

A ingressar alguns ácidos no interior da massa de concreto, podem formar sais insolúveis e expansivos, causando fissuração e posterior deterioração do concreto. Se ao contrário, os produtos resultantes forem solúveis, há o incremento da porosidade e se acelera o processo de perda de massa e deterioração (HUSNI, 2003 apud GAIER, 2005).

Neste contexto, observou-se que a presença do ácido no aditivo acelerou o processo de deterioração do concreto e perda da massa. Garcez, Santos e Gatto (2013) salientam que uma diminuição da massa específica ocasiona uma proporcional perda na resistência à compressão axial e a compressão diametral.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo químico de modificação do poliestireno expandido resultou em um poliestireno sulfonado que foi utilizado no concreto como aditivo dispersante. Contudo, a eficácia da sulfonação não pode ser comprovada devido à ausência de um ensaio para determinação do grau de sulfonação (GS). O GS, dado em porcentagem, indica o número de grupos sulfônicos presentes por mol de polímero sulfonado, quanto maior o grau mais passível de interação com as partículas de cimento.

O aditivo teve uma atuação confirmada como dispersante de partículas nas dosagens de 0,5% e 1,0% em relação a massa do ligante, nessas quantidades constatou-se uma diminuição na água utilizada para alcançar a consistência de referência. Porém, o aditivo não teve a redução de água esperada, o pH ácido do poliestireno sulfonado aumentou a força iônica de atração nas partículas de cimento.

Observou-se que, com um aumento na porcentagem de aditivo, a capacidade resistente à compressão e a tração por compressão diametral era reduzida. A perda da resistência dos concretos com o aditivo e com a mesma consistência do concreto de referência foi determinada pela perda da massa específica do concreto. Devido a acidez do aditivo e presença do ácido sulfúrico restante da sulfonação, o concreto teve uma rápida perda de massa e eventual deterioração.

Com relação a absorção de água e índice de vazios, não se notou alterações significativas entre o concreto de referência e os concretos com 0,5% e 1,0%. Já o concreto com a maior porcentagem da pesquisa, apresentou uma redução nesse parâmetro.

A máxima quantidade de diminuição de água foi de 8,67%, de acordo com a NBR NM 11768 (ABNT, 2011) a quantidade mínima de redução de água para o aditivo ser considerado um superplastificante é de 12% em relação ao concreto de referência.

Assim como, o aumento da resistência aos 28 dias deve ser maior ou igual a 115%, em todos os concretos com aditivo não se obteve aumento na resistência à compressão na idade desejada. Dessa forma, com as características conquistadas no processo químico apresentado neste trabalho, o aditivo não pode ser considerado um superplastificante como também não pode ser utilizado no concreto para outros fins devido a sua aceleração do processo de deterioração do concreto.

No entanto, a utilização do poliestireno sulfonado como aditivo com alta redução de água não pode ser descartada. Para aproveitar sua total capacidade como

dispersante de partículas, após a finalização da reação química, é necessário aumentar o pH da solução a fim de torná-la de neutra a básica. Este aumento do pH é necessário para eliminar a atração iônica que surge na hidratação do cimento.

Além de aumentar o pH é desejável que o ácido sulfúrico restante da reação química seja eliminado da solução, visto que acelerou o processo de deterioração do concreto.

SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTUROS

- Determinar o grau de sulfonação após o término da reação química, pois um poliestireno sulfonado com maior grau de sulfonação é mais passível de interação com o cimento. A quantidade de poliestireno e sulfato de acetil podem influenciar no grau de sulfonação.
- Realizar ensaios microscópios de caracterização do poliestireno sulfonado como a determinação da massa molar, análises térmicas e espectroscopia a fim de ter uma melhor compreensão da interação do poliestireno sulfonado com as partículas de cimento.
- Neutralizar a solução de poliestireno sulfonado após o término da reação a fim de aumentar o pH, uma reação muito ácida e o restante de ácido sulfúrico no aditivo foi um fator determinante na redução de sua capacidade resistente e dispersão de partículas. A adição de hidróxido de sódio (NaOH) ao término da reação pode aumentar o seu pH.
- Determinar a compressão axial para menores idades de cura do concreto com o objetivo de avaliar se ocorre um aumento da resistência nas idades iniciais antes de um possível decréscimo.
- Para ter a total confirmação do aditivo como superplastificante realizar além do ensaio de compressão e abatimento de tronco de cone, o ensaio de teor de ar no concreto fresco pela NBR NM 47 e tempo de pega pela NBR NM 9.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P.-C. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research** **30**, p. 1349-1359, 2000.

AÏTCIN, P.-C. **High performance concrete**. London: E&F SPON, 1998.

AMIANI, M.I; BOTARO V.R. Concreto impregnado com polímero (CIP): uso e aplicação do EPS reciclado para redução da permeabilidade de superfícies de concreto. **Revista Matéria**, v. 13, n. 4, p. 664 – 673, 2008.

ANDRADE, J.J.O. Propriedades dos Polímeros. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, p. 1263-1291, 2007.

ARAÚJO, C. G. L.; FREIRE, C. B.; TELLO, C. C. O. Síntese e caracterização de um aditivo tipo superplastificante obtido a partir de copos plásticos de poliestireno. In: **2013 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013**, 2013, Recife, PE. Proceedings of INAC 2013. Rio de Janeiro, RJ: ABEN, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 33**: Concreto - Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 9778**: Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da Absorção de água, Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento Rio de Janeiro, 2015.

ASSUNÇÃO, R. M. N.; ROYER, B.; OLIVEIRA, J. S.; RODRIGUES FILHO, G.; MOTTA, L. A. C. Synthesis, characterization, and application of the sodium poly(styrenesulfonate) produced from waste polystyrene cups as an admixture in. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 96, n.5, p. 534- 1538, 2005.

BECKER, C. M. **Obtenção e caracterização de polietrólitos sulfonados à base de copolímeros estirênicos para membranas poliméricas**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

BRUNO, L.E.R. ; AGNELLI, J. A. M. **Processo de transformação do poliestireno expandido (isopor) em ionomeros de poliestireno sulfonado**. Patente PI 0602539-0 2006.

CALDARONE, M. A. **High-strength concrete: a practical guide**. London, Taylor & Francis, 2009.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica 55**, p. 18-32, 2009.

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil: revisão. **Cerâmica (São Paulo. Impresso)**, vol.57, no.341, p. 63-75, 2011.

CHANDRA, S.; BJORNSTROM, J. Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars – Part II. **Cement and Concrete Research 32**, p. 1613–1619, 2002a.

CHANDRA, S.; BJORNSTROM, J. Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars – Part I. **Cement and Concrete Research 32**, p. 1605–1611, 2002b.

CRUZ, A. A. F. **Estudo sobre a utilização do resíduo da queima da biomassa da argamassa**. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos Avançados. Universidade Federal de Santa Carina, 2002.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DOMONE, P. L. Fresh Concrete. In NEWMAN, J.; CHOO B. S. **Advanced concrete technology: Concrete properties**, Ed. Butterworth-Heinemann, 2003. p. 1/3- 1/29.

EDMEADES, R. M.; HEWLETT, P. C. Cement Admixtures. In: HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**, Ed. Arnold, London, 1998. p. 841-905.

FIGUEIREDO, E. P.; RÊGO, J. H. S. Materiais e Produtos Poliméricos. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 1329-1354.

FLATT, R. J.; BOWEN, P. Electrostatic repulsion between particles in cement suspensions: Domain of validity of linearized Poisson-Boltzmann equation for nonideal electrolytes. **Cement and Concrete Research** **33**, p. 781-791, 2003.

FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2005.

GAIER, C. V. **Análise de desempenho de materiais de reparos industrializado para estruturas de concreto frente ao ataque ácido**. Dissertação de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

GARCEZ M. R., SANTOS, T.; GATTO, D. A. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos pré-moldados com adição de serragem em substituição ao agregado miúdo**. *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*, pg. 95 – 104, 2013.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA G.C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. v.1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 415-451.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 905-944.

HOOTON, R. D.; EL-DIEB, A. S. Evaluation of water permeability oh high performance concrete. In: SAKAI, K.; BANTHIA, N.; GJORV, O.E. **Concrete under severe conditions: environment and loading**, Ed E & FN SPON, London, 1995. p. 423-432.

JACKSON, P. J. Portland Cement: Classification and Manufacture. In: HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**, Ed. Arnold, London, 1998. p. 25-94.

KAUPPI, A.; ANDERSSON K. M.; BERGSTRFM, L. Probing the effect of superplasticizer adsorption on the surface forces using the colloidal probe AFM technique. **Cement and Concrete Research** **35**, p. 133–140, 2005.

KAY, E. A. Hot and cold weather concreting. In NEWMAN, J.; CHOO B. S. **Advanced Concrete Technology: Concrete Properties**, Ed. Butterworth-Heinemann, 2003. p. 5/1- 5/18.

KOŁTUŃCZYK, E.; NOWICKA, G. Effect of poly (sodium- 4-styrenesulphonate) additives on properties of cement suspensions. **Proceedings of International Scientific Conference. "Surfactants and Dispersed Systems in Theory and Practice"**, Ed: K.A. Wilk, PALMAPress, Wrocław, s. 533–536, 2007.

LAWRENCE, C. D. The constitution and specification of portland cements. In: HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**, Ed. Arnold, London, 1998. p. 131-193.

LYRA, J. S. **Estudo da influência de policarboxilato comercial na hidratação, reologia e físico-química de superfície do cimento**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, S. Paulo, SP (2010).

MAKOWSKI, H.S.; LUNDBERG, R.D.; SINGHAL, G. H. - U.S. **pat. 3,870, 841** assigned to Exxon Research and Engineering Co., 1975.

MAROTTA, Theodore W. **Basic Construction materials**. 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.

MARTINS, C. R.; RUGGERI, G.; PAOLI, M.A. Synthesis in pilot plant scale and physical properties of sulfonated polystyrene. **J. Braz. Chem. Soc.**, Vol. 14, No. 5, 797-802, 2003.

MASSAZA, F. Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**, Ed. Arnold, London, 1998. p. 471-635.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructure, properties, and materials**, third edition, McGraw-Hill, 2006.

MOIR, G. Cements. In NEWMAN, J.; CHOO B. S. **Advanced concrete technology: constituent materials**, Ed. Butterworth-Heinemann, 2003. p. 1/3- 1/45.

MOLLAHT, M. Y.A., PALTA, P., HESS, T. R.; VEMPATI, R. K.; COCKEF, D. Chemical and physical effects of sodium lignosulfonate superplasticizer on the hydration of portland cement and solidification/stabiization consequences. **Cement and Concrete Research** **25**, p. 671-682, 1995.

NAWY, E.G. **Fundamental of High Performance Concrete**, 2nd edition, John Wiley & sons, 2001.

NEHDI, M.; MINDESS, S; AİTCIN, P.-C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. **Cement and Concrete Research** **28**, p. 687–697, 1998.

NILSON, L.-O. Durability concept: pore structure and transport processes. In NEWMAN, J.; CHOO B. S. **Advanced Concrete Technology: Concrete Properties**, Ed. Butterworth-Heinemann, 2003. p. 8/3- 8/29.

ODLER, I. Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. In: HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**, Ed. Arnold, London, 1998. p. 241-297.

OKPALA, D. C. Pore structure of hardened cement paste and mortar. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, vol. 11, no. 4, p. 245–254, 1989.

OLIVEIRA, H. M. Cimento Portland. In: BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 1**. 5. ed. revisada. Rio de Janeiro: Livro técnicos e científicos, 2000a. p. 35-62.

OLIVEIRA, H. M. Propriedades do concreto endurecido. In: BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 1**. 5. ed. revisada. Rio de Janeiro: Livro técnicos e científicos, 2000b. p. 284-313.

OLIVEIRA, I. R.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos refratários na presença de diferentes tipos de aditivo e ligante hidráulico. **Cement and Concrete Research** **53**, pg. 263–269, 2007.

OMENA, T. H. **Argamassa modificada com poliestireno sulfonado a partir de copos plásticos descartados**; 2012; Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

PEREIRA, V. M. **Permeabilidade ao ar do concreto**; 2011; 0 f; Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, 2011.

POOLE. A. W., ST.JOHN, D. A.; SIMS, I. **Concrete petrography – A handbook of investigative techniques**, First edition, Ed. Arnold - John Wiley, New York, 1998.

ROYER, B.; ASSUNCAO; R. M. N.; RODRIGUES F^o, G.; MOTTA, L. A. C. Efeito da aplicação do poliestireno sulfonado (PSSNa) como aditivo em argamassas e concretos de cimento Portland CPV32. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 15, nº 1, p. 63-67, 2005.

SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R.J. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research** **38**, pg. 128–136, 2008.

SHAH, S. P. Future of concrete as construction material. In: SAKAI, K.; BANTHIA, N.; GJORV, O.E. **Concrete under severe conditions: Environment and loading**, Ed E & FN SPON, London, 1995. p. 21-35.

SOBRAL, E. S. Propriedades do Concreto Fresco. In: BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 1**. 5. ed. revisada. Rio de Janeiro: Livro técnicos e científicos, 2000. p. 267-283.

SOUZA, T. S. **Utilização de um polímero pós-consumo sulfonado como aditivo de sistemas cimentícios**; 2012; Dissertação (Mestrado em Pós-Graduação Em Engenharia de Materiais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2012.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo. Ed PINI, 1998.

STEFFE, J. F. **Rheological Methods in Food Process Engineering**. 2nd. ed. Michigan: Freeman Press, 1996.

TESSARI, J. **Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

UNIPAMPA. **Relatório de dosagem de concreto de Materiais de Construção Civil II**. Universidade Federal do Pampa, 2015.

VILASBOAS, J.M.L. **Durabilidade das edificações de concreto armado em Salvador: uma contribuição para a implantação da NBR 6118:2003**. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo), Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

YOSHIOKA, K.; TAZAWA E.; KAWAI K.; ENOHATA T. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals. **Cement and Concrete Research** **32**, p. 1507–1513, 2002.

APÊNDICES

A- Força em KN de compressão gerada pela máquina do ensaio

Referência			0,5% de aditivo			1% de aditivo			1,5% de aditivo		
CR1	232,4	KN	CV1	184,6	KN	CX1	152,1	KN	CXV1	174,1	KN
CR2	217,3	KN	CV2	206	KN	CX2	196,7	KN	CXV2	180,1	KN
CR3	225,5	KN	CV3	189,5	KN	CX3	202,7	KN	CXV3	157,4	KN
CR4	231,2	KN	CV4	202,2	KN	CX4	179,2	KN	CXV4	189,5	KN

B- Massas do ensaio de imersão

Referência											
Massa emersa após fervura (m _i)				m _i médio				Saturada (m _{sat})		Massa seca (m _s)	
CR1	2264,9	g	2207,9	g	2236,4	g	3858,1	g	3618,5	g	
CR2	2280,7	g	2284,1	g	2282,4	g	3895,1	g	3660,2	g	
CR3	2252,9	g	2231,3	g	2242,1	g	3817,3	g	3597,9	g	
CR4	2247,5	g	2256	g	2251,75	g	3858	g	3631,8	g	
0,5% de aditivo											
Massa emersa após fervura (m _i)				m _i médio				Saturada (m _{sat})		Massa seca (m _s)	
CV1	2270,1	g	2242,4	g	2256,25	g	3848	g	3604,6	g	
CV2	2211,5	g	2288,5	g	2250	g	3891,4	g	3661,3	g	
CV3	2233,6	g	2240,4	g	2237	g	3836,2	g	3625,8	g	
CV4	2240,6	g	2246,1	g	2243,35	g	3852,8	g	3621,4	g	
1% de aditivo											
Massa emersa após fervura (m _i)				m _i médio				Saturada (m _{sat})		Massa seca (m _s)	
CX1	2142,5	g	2160,8	g	2151,65	g	3761,9	g	3492,7	g	
CX2	2259,2	g	2270,7	g	2264,95	g	3865,1	g	3641,3	g	
CX3	2337,9	g	2343,6	g	2340,75	g	3958,9	g	3710,4	g	
CX4	2310,3	g	2315	g	2312,65	g	3921,1	g	3754,9	g	
1,5% de aditivo											
Massa emersa após fervura (m _i)				m _i médio				Saturada (m _{sat})		Massa seca (m _s)	
CXV1	2271,9	g	2280,4	g	2276,15	g	3687,4	g	3416,8	g	
CXV2	2093,9	g	2101,9	g	2097,9	g	3886,7	g	3657,8	g	
CXV3	2295,8	g	2298	g	2296,9	g	3898,2	g	3691,4	g	
CXV4	2282,5	g	2283,6	g	2283,05	g	3878,4	g	3671,4	g	

C- Massas Específicas

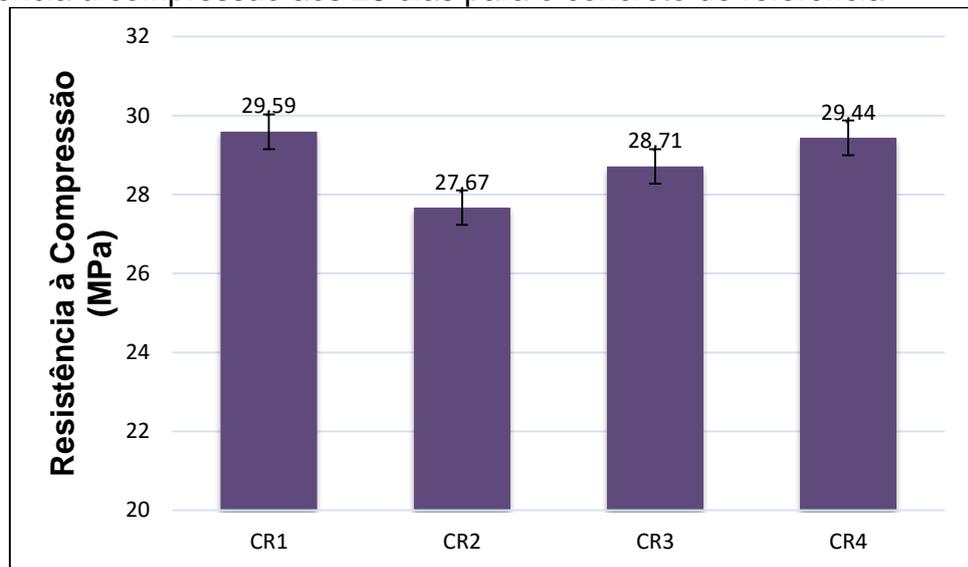
	Mas. esp. seca		Mas. esp. saturada		Mas, esp. real	
Referência						
CR1	2,2313	g/cm ³	2,379047	g/cm ³	2,618117	g/cm ³
CR2	2,26961	g/cm ³	2,415266	g/cm ³	2,656554	g/cm ³
CR3	2,284091	g/cm ³	2,423375	g/cm ³	2,65371	g/cm ³
CR4	2,261043	g/cm ³	2,401868	g/cm ³	2,631644	g/cm ³
0,5% de aditivo						
CV1	2,264552	g/cm ³	2,417465	g/cm ³	2,673341	g/cm ³
CV2	2,230596	g/cm ³	2,370781	g/cm ³	2,594275	g/cm ³
CV3	2,267259	g/cm ³	2,398824	g/cm ³	2,610743	g/cm ³
CV4	2,250085	g/cm ³	2,393861	g/cm ³	2,627916	g/cm ³
1,0% de aditivo						
CX1	2,169042	g/cm ³	2,336221	g/cm ³	2,604452	g/cm ³
CX2	2,275599	g/cm ³	2,415461	g/cm ³	2,645621	g/cm ³
CX3	2,292989	g/cm ³	2,446559	g/cm ³	2,709013	g/cm ³
CX4	2,334484	g/cm ³	2,437813	g/cm ³	2,603501	g/cm ³
1,5% de aditivo						
CXV1	2,421116	g/cm ³	2,612861	g/cm ³	2,995485	g/cm ³
CXV2	2,044835	g/cm ³	2,172797	g/cm ³	2,344894	g/cm ³
CXV3	2,305252	g/cm ³	2,434397	g/cm ³	2,647114	g/cm ³
CXV4	2,301313	g/cm ³	2,431065	g/cm ³	2,644434	g/cm ³

D – Força em KN gerada no ensaio de compressão diametral

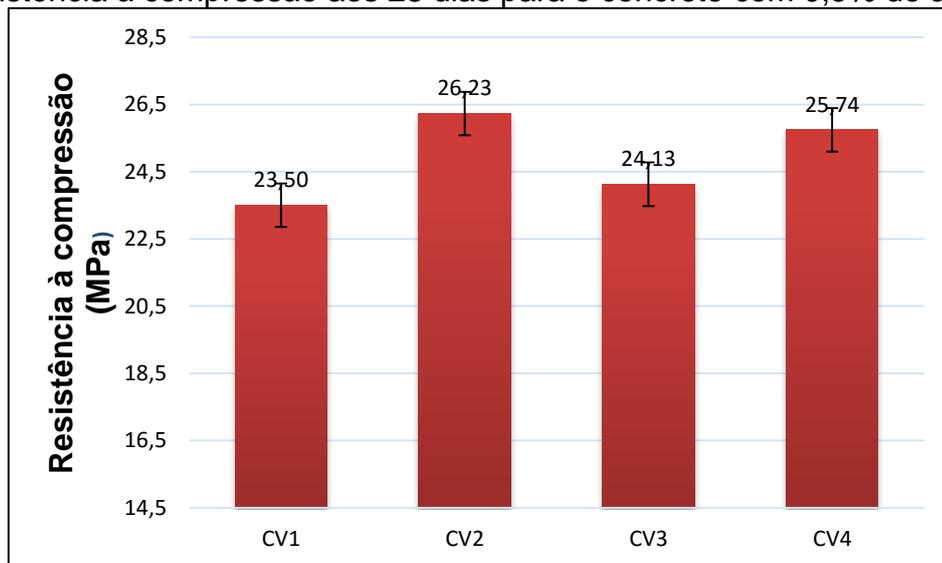
Referência			0,5% de aditivo			1% de aditivo			1,5% de aditivo		
CR1	114,4	KN	CV1	95,2	KN	CX1	116	KN	CXV1	106,9	KN
CR2	105,6	KN	CV2	84,6	KN	CX2	110,5	KN	CXV2	87	KN
CR3	83,4	KN	CV3	110,6	KN	CX3	102,9	KN	CXV3	87,8	KN
CR4	104,2	KN	CV4	76,5	KN	CX4	110,4	KN	CXV4	117,1	KN

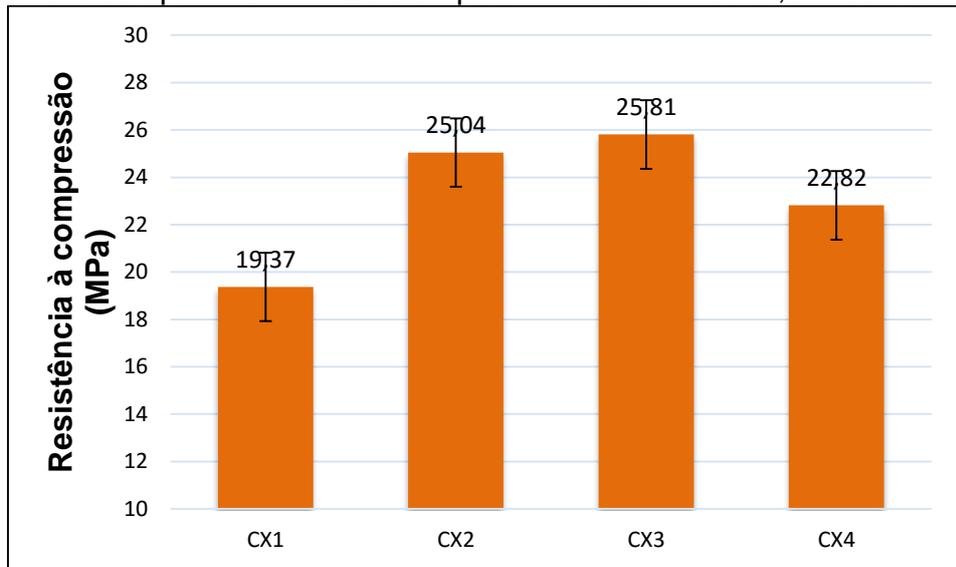
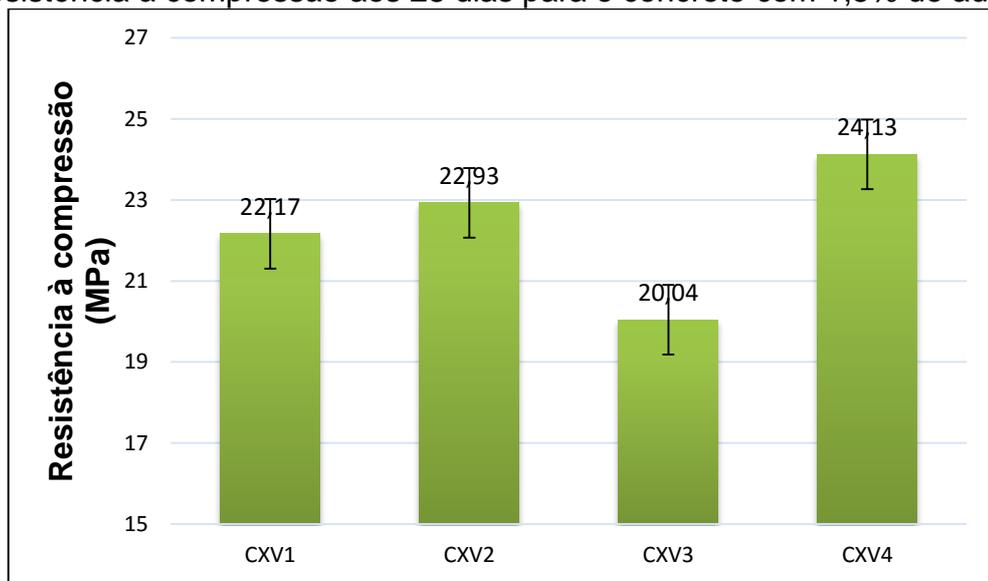
E – Gráficos individuais dos ensaios

E1 - Resistência à compressão aos 28 dias para o concreto de referência

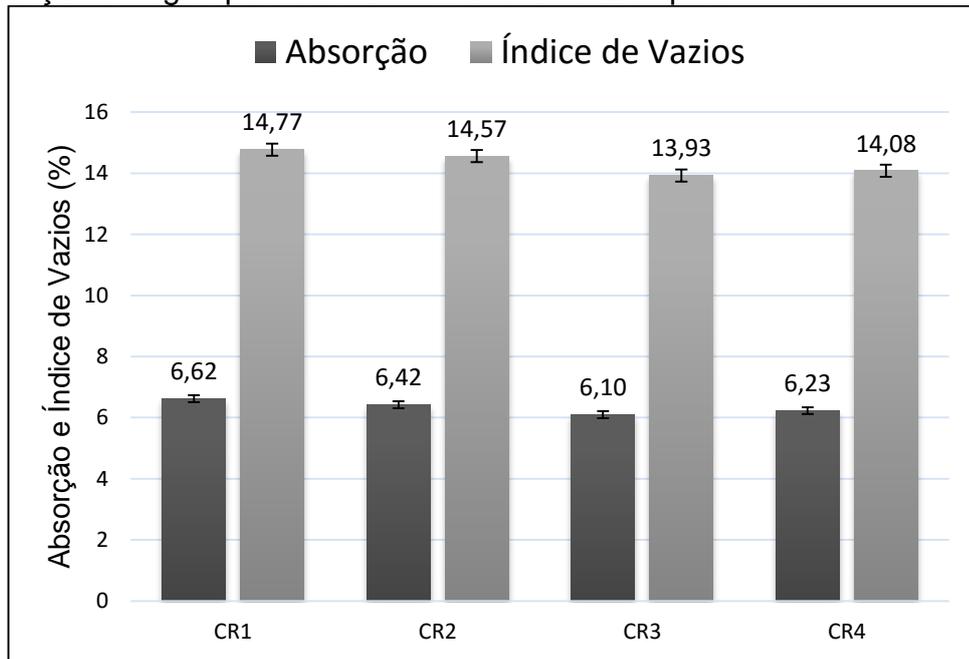


E2 - Resistência à compressão aos 28 dias para o concreto com 0,5% de aditivo

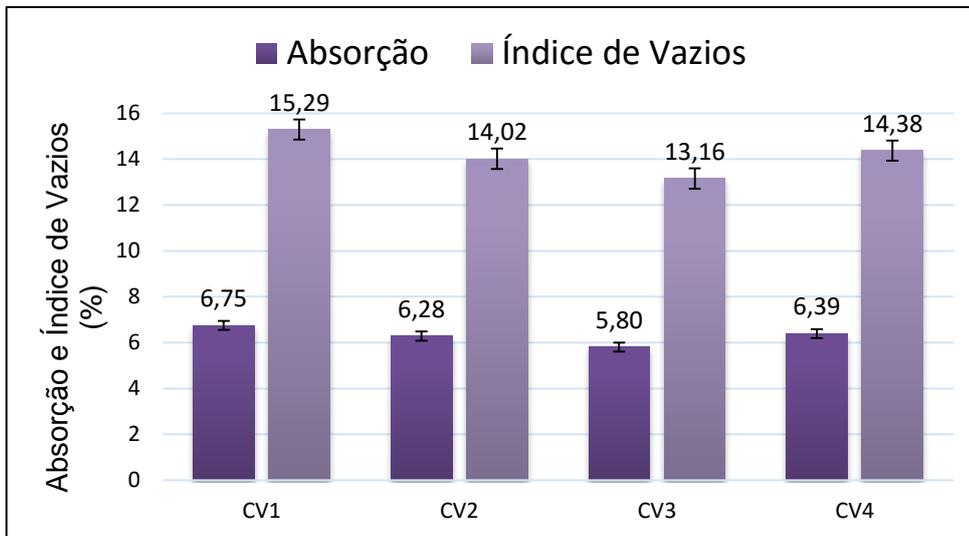


E3 - Resistência à compressão aos 28 dias para o concreto com 1,0% de aditivo**E4 - Resistência à compressão aos 28 dias para o concreto com 1,5% de aditivo**

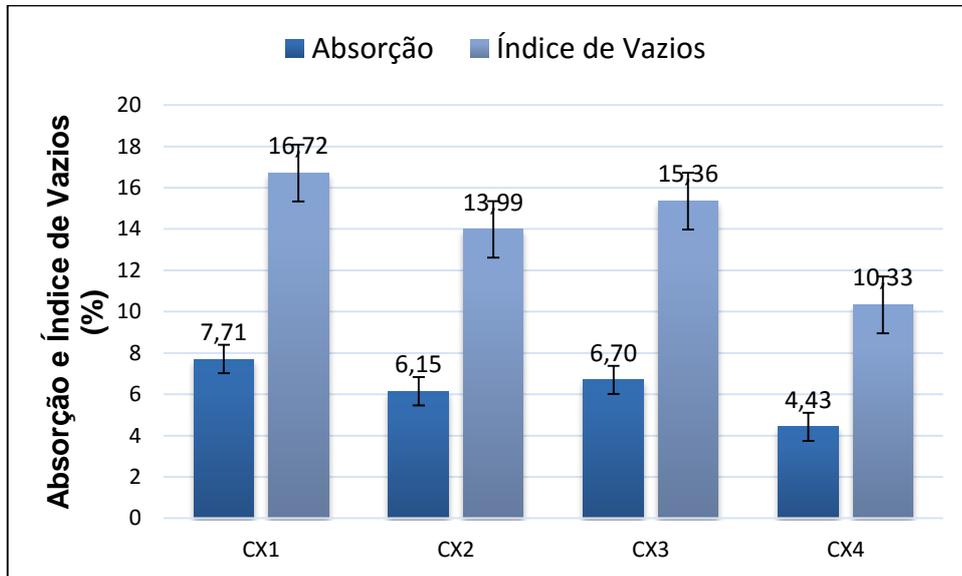
E5 - Absorção de água por imersão e índice de vazios para o concreto de referência



E6 - Absorção de água por imersão e índice de vazios para o concreto com 0,5% de aditivo



E7 - Absorção de água por imersão e índice de vazios para o concreto com 1,0% de aditivo



E8 - Absorção de água por imersão e índice de vazios para o concreto com 1,5% de aditivo

